

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät  
Sektion Geographie  
Institut für Ökosystemforschung

# **Jungholozäne Landschaftsentwicklung an der nordfriesischen Küste am Beispiel von Waldhusen bei Pellworm und Amrum**

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften  
(Dr. rer. nat.)  
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

**Sophia Dazert**

Kiel, Juni 2021



Dekan:	Prof. Dr. Frank Kempken
Erstgutachter:	Prof. Dr. Hans-Rudolf Bork
Zweitgutachter:	Prof. Dr. Wilfried Hoppe
Termin der Disputation:	29.10.2021
Zum Druck genehmigt:	29.10.2021

Kiel, den

Der Dekan



## Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Betreuer, Prof. Dr. Hans-Rudolf Bork, bedanken. Er gehört zu den wenigen Menschen die immer daran geglaubt haben, dass diese Dissertation fertig wird. Seine aufmunternden Worte haben mir über die zum Teil körperlich sehr anstrengende Geländearbeit, über langwierige Laboranalysen und die aufwendige Zeit des Schreibens hinweggeholfen. Er hat mich immer wieder von Neuem motiviert, nicht aufzugeben und weiter zu machen. Sein Erfahrungsschatz, nicht nur bei der fachlichen, sondern auch bei der psychischen Betreuung seiner Doktoranden und Doktorandinnen ist von großem Wert für mich gewesen.

Bei Prof. Dr. Ingmar Unkel möchte ich mich für die Unterstützung in allen EDV-Belangen, für die moralische Unterstützung und für unsere Freundschaft bedanken. Er hat mein Interesse für das Statistikprogramm „R“ geweckt und mir bei diversen Formatierungsproblemen geholfen. Neben Hans-Rudolf-Bork war Ingmar Unkel mir immer eine große Unterstützung in allen Belangen und hat ebenfalls an das Projekt Dissertation geglaubt.

Die größte Unterstützung bei der Auswertung meiner Körnungsdaten in R habe ich von Dr. Joana Seguin bekommen. Sie hatte immer ein offenes Ohr für meine vielen Fragen und hat diese in einer für mich verständlichen Sprache und kollegialen Art beantwortet.

Den größten Teil dieser Dissertation hat die Geländearbeit auf Pellworm und Amrum in Anspruch genommen. Für die Unterstützung dort gilt mein grenzenloser Dank Dr. Svetlana Khamnueva-Wendt. Ihre Kompetenz bei allen wissenschaftlichen und technischen Fragen im Gelände, bei der Auswahl der Proben für die Laboranalysen und unser freundschaftlicher Umgang waren für mich von sehr großem Wert. Anschließend möchte ich mich bei Jann Wendt bedanken, ein starker Arm und die Ruhe und Ausgeglichenheit eines Dithmarschers ist im Gelände immer von Vorteil.

Neben Svetlana und Jann haben mich viele weitere Menschen im Gelände und am Institut unterstützt, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Namentlich möchte ich hier Florian Bauer erwähnen, der mich bei den Drohnenüberfliegungen unterstützt und aus den entstandenen Luftbildern die Geländemodelle in dieser Arbeit erstellt hat. Thomas Zakel hatte mit seinem Pragmatismus stets eine Lösung für technische Probleme im Gelände parat und war eine große Hilfe beim Bohren. Danke dafür!

In der Ökotechnikhalle waren Marcus Schütz und Mathias Bahns jederzeit geduldige und kompetente Ansprechpartner. Der Schlickschlitten für den Sedimenttransport im Watt wurde von Marcus gebaut, Mathias hat vor jeder Exkursion die Ausrüstung für die Rammkernsonde gewissenhaft zusammengepackt, so dass im Gelände nichts fehlte. Auch Ihnen gilt mein Dank.

Für die professionellen und zugleich attraktiven Profilzeichnungen möchte ich mich bei unserer Designerin Doris Kramer bedanken; jeder noch so kleine Änderungswunsch wurde schnell und professionell von ihr umgesetzt.

Yasmin Dannath und Tjark Martens danke ich herzlich für die Bestimmung der botanischen Makroreste.

Unsere Sekretärin Britta Witt hat mir mit Ruhe und Geduld durch die Verwaltungsbürokratie der Universität geholfen. Sie hatte immer ein offenes Ohr für Probleme aller Art. Vielen Dank, Britta!

Für die tatkräftige und konstruktive Unterstützung vor Ort gilt mein Dank Helmut Bahnsen auf Pellworm, der uns den Standort Waldhusen durch eine Wattwanderung nahegelegt hat und Jens Quedens auf Amrum, der unser Interesse für die dortigen Untersuchungsstandorte geweckt hat.

Meinem Lebenspartner Dr. Georg Hörmann möchte ich an dieser Stelle für die allumfassende seelische, moralische, fachliche und kulinarische Unterstützung danken. Sein humoriger Zynismus hat mich in schwierigen Situationen zum Lachen gebracht. Hefezöpfe und andere bayrisch-schwäbisch Köstlichkeiten haben mir oft geholfen, produktiv weiterzuarbeiten.

Meiner Familie danke ich dafür, dass sie da ist. Ohne sie wäre mein Leben nicht vollständig.

# Inhalt

Danksagung .....	I
Inhalt.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VII
Zusammenfassung.....	VIII
Summary .....	IX
1. Einführung .....	1
1.1 Die pleistozäne und frühholozäne Klimadynamik und Geogenese.....	1
1.2 Übersicht zu den Mensch-Umwelt-Interaktionen.....	3
1.3 Pellworm.....	5
1.4 Amrum .....	5
1.5 Forschungsfragen .....	7
1.6 Die Struktur der Arbeit .....	8
2 Methoden.....	9
2.1 Gelände.....	9
2.1.1 Bohrungen .....	9
2.1.2 Grabungen.....	10
2.2 Datierungen .....	12
2.3 Labor .....	12
2.4 Software.....	14
3 Lage der Untersuchungsgebiete .....	15
4 Forschungsarbeiten um Waldhusen bei Pellworm .....	16
4.1 Lage der Profile.....	16
4.2 Stratigraphie PWAP (Pellworm, Dauergrünland) .....	17
4.3 Stratigraphie PWP (Pellworm, Warft) .....	24
4.4 Stratigraphie PB1P (Pellworm, Brunnenprofil 1).....	28
4.5 Stratigraphie PB2P (Pellworm, Brunnenprofil 2).....	31
4.6 Stratigraphie PB3P (Pellworm, Brunnenprofil 3).....	36
4.7 Stratigraphie PG2P (Pellworm, Grabenprofil 2) .....	39
4.8 Stratigraphie PRP (Pellworm, Rechteckprofil).....	42
4.9 Stratigraphie PTP (Pellworm, Torfprofil) .....	45
5 Forschungsarbeiten auf Amrum.....	49
5.1 Lage der Profile Krümwaal 00 und 01 .....	49
5.2 Der Standort KRW 00.....	50

5.2.1	Stratigraphie von KRW 00 .....	50
5.3	Der Standort KRW 01.....	56
5.3.1	Stratigraphie KRW 01 (Amrum, Profil Krümwaal 01) .....	56
5.4	Meeram .....	62
5.4.1	Stratigraphie der Bohrung MER 01 .....	64
5.4.2	Stratigraphie der Bohrung MER 03 .....	65
5.4.3	Dünendynamik und Bodenbildung bei Meeram .....	67
6.	Gesamtinterpretation .....	68
6.1	Die Flur Waldhusen im Watt nördlich Pellworm .....	68
6.2	Der Krümwaal auf Amrum.....	70
6.3	Das Untersuchungsgebiet Meeram am Dünenrand im Nordwesten von Amrum....	72
6.4	Vergleich der Geoökodynamik der Ökosysteme Marsch/Watt und Geestkerninsel	73
7.	Literatur.....	75
8.	Anhang .....	79
8.1	Einstellungen Mastersizer 2000, Korngrößenanalyse .....	79
8.2	R-Skript Körnung.....	80
9.	Eidesstattliche Erklärung.....	86



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geoarchäologische Grabungen um Waldhusen nördlich von Pellworm.....	11
Abbildung 2: Geoarchäologische Grabungen um Waldhusen nördlich von Pellworm.....	11
Abbildung 3: Lage der Untersuchungsgebiete .....	15
Abbildung 4: Lage der Profile in der Flur Waldhusen bei Pellworm .....	16
Abbildung 5: Profilzeichnung PWAP .....	20
Abbildung 6: Korngrößendreieck PWAP .....	21
Abbildung 7: Südlicher Abschnitt PWAP .....	22
Abbildung 8: Südlicher zentraler Abschnitt PWAP .....	22
Abbildung 9: Nördlicher zentraler Abschnitt PWAP .....	23
Abbildung 10: Nördlicher Abschnitt PWAP .....	23
Abbildung 11: Profilzeichnung PWP .....	25
Abbildung 12: Korngrößendreieck PWP .....	26
Abbildung 13: Verfülltes Grabensystem an der Warft Waldhusen .....	27
Abbildung 14: Arbeitsbedingungen an der Warft Waldhusen .....	27
Abbildung 15: Profilzeichnung PB1P .....	28
Abbildung 16: Korngrößendreieck PB1P .....	29
Abbildung 17: Brunnenprofil 1, PB1P .....	30
Abbildung 18: Brunnenprofil 1, PB1P .....	30
Abbildung 19: Profilzeichnung PB2P .....	34
Abbildung 20: Korngrößendreieck PB2P .....	35
Abbildung 21: Brunnenprofil 2, PB2P .....	35
Abbildung 22: Profilzeichnung PB3P .....	37
Abbildung 23: Korngrößendreieck PB3P .....	38
Abbildung 24: Profilzeichnung PG2P .....	40
Abbildung 25: Korngrößendreieck PG2P .....	41
Abbildung 26: Grabenprofil 2 .....	41
Abbildung 27: Profilzeichnung PRP .....	43
Abbildung 28: Korngrößendreieck PRP .....	44
Abbildung 29: Rechteckprofil .....	44
Abbildung 30: Profilzeichnung PTP .....	46
Abbildung 31: Korngrößendreieck PTP .....	47
Abbildung 32: Torfprofil .....	47

Abbildung 33: Ausschnitt aus Profil PTP mit Wagenspuren .....	48
Abbildung 34: Lage der beiden Krümwaal-Profile .....	49
Abbildung 35: Profilzeichnung KRW 00.....	52
Abbildung 36: Korngrößendreieck KRW 00.....	54
Abbildung 37: Wallparallele Kopfseite des Profils KRW 00.....	54
Abbildung 38: Nördlicher Wallhang des Profils KRW 00.....	55
Abbildung 39: Nördlicher Wallfuß des Profils KRW 00 .....	55
Abbildung 40: Nördlicher Wallfuß des Profils KRW 00 .....	56
Abbildung 41: Korngrößendreieck KRW 01.....	60
Abbildung 42: Drohnfoto vom Profil KRW 01 .....	60
Abbildung 43: Gesamtansicht KRW 01.....	61
Abbildung 44: Profil KRW 01, Ostseite, Sand-Humus-Bänder .....	61
Abbildung 45: Lage der Bohrungen Meeram .....	62
Abbildung 46: Meeram, Farbrelief mit Höhenlinien .....	63
Abbildung 47: Korngrößendreieck MER 01 .....	65
Abbildung 48: Korngrößendreieck MER 03 .....	66

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Laboranalysen PWAP.....	21
Tabelle 2: Bodenarten PWAP .....	21
Tabelle 3: Laboranalysen PWP .....	26
Tabelle 4: Bodenarten PWP .....	26
Tabelle 5: Laboranalysen PB1P .....	29
Tabelle 6: Bodenarten PB1P.....	29
Tabelle 7: Laboranalysen PB2P .....	34
Tabelle 8: Bodenarten PB2P.....	34
Tabelle 9: Laboranalysen PB3P .....	37
Tabelle 10: Bodenarten PB3P.....	38
Tabelle 11: Laboranalysen PG2P .....	40
Tabelle 12: Bodenarten PG2P .....	40
Tabelle 13: Laboranalysen PRP .....	43
Tabelle 14: Bodenarten PRP.....	43
Tabelle 15: Laboranalysen PTP.....	46
Tabelle 16: Bodenarten PTP .....	46
Tabelle 17: Laboranalyse KRW 00 .....	53
Tabelle 18: Bodenarten KRW 00 .....	53
Tabelle 19: Bodenarten KRW 01 .....	59
Tabelle 20: Bodenarten MER 01.....	64
Tabelle 21: Bodenarten MER 03.....	66

## Zusammenfassung

In dieser Dissertation wird die holozäne Genese von Kleinräumen im westlichen Nordfriesland mit geoarchäologischen Feld- und Labormethoden untersucht: in der ehemaligen Flur Waldhusen im Watt unmittelbar nördlich von Pellworm und in zwei Bereichen auf der Amrumer Geest.

Im Watt von Waldhusen befinden sich zahlreiche Relikte mittelalterlich-neuzeitlicher Landnutzung, darunter eine erodierte Warft, Humushorizonte, zwei Systeme von Entwässerungsgräben, Brunnen und Fahrspuren. Der vulnerable Raum wurde aufgrund der marinen Ressourcen und der hohen Fruchtbarkeit der kalkhaltigen, schluffig-tonigen Wattsedimente trotz der beträchtlichen Naturgefahren wie dem Meeresspiegelanstieg und den zwar seltenen, aber verheerend wirkenden Sturmfluten in Kultur genommen. Extreme Sturmfluten beendeten hier 1362 und 1634 die agrarische Landnutzung. Sie wandelten Kulturland in ein hochdynamisches Watt. Damit wurden dort frühere Siedlungs- und Landnutzungssituationen ohne jüngere anthropogene Überprägungen konserviert. Dies macht diesen Naturraum für die geoarchäologische Forschung bedeutsam.

Auf Amrum wurden Geoarchive untersucht, an denen in den vergangenen Jahrtausenden Akkumulation dominierte: Am östlichen Rand des Dünengürtels bei Meeram wurde unter Dünensanden ein Niedermoor identifiziert, das bis zum Hochmittelalter auf pleistozänen Sedimenten aufwuchs. Unter dem Krümwaal auf der östlichen Geest liegen etwa 8.200 Jahre alte Kolluvien und eine Siedlungsgrube. Sie belegen eine unerwartete frühe Besiedlung und Landnutzung im Übergang vom Mesolithikum zum Neolithikum. Auch die erste Anlage eines flachen Walls am Krümwaal fand früher statt als nach der Literatur zu erwarten: vor mehr als 2.000 Jahren. Vermutlich ist der erste Krümwaal eine bewusst angelegte Flur- oder Siedlungsgrenze.

Die exemplarisch untersuchten Standorte belegen die hohe räumliche und zeitliche Variabilität vor allem der jungholozänen Ökosystementwicklung in einem hochvulnerablen Lebensraum, den heutigen nordfriesischen Inseln und dem Wattenmeer.

## Summary

This dissertation examines the development of small areas in western North Frisia during the Holocene with geoarchaeological field and laboratory methods: In the former agricultural land at Waldhusen in the mudflats north of Pellworm and in two areas on the Geest of Amrum.

The mudflats at Waldhusen contain numerous relics of medieval and early modern land use, including an eroded settlement mound, humic horizons, two systems of drainage ditches, wells and driving tracks. The vulnerable space was cultivated because of the marine resources and the high fertility of the calcareous, silty-clay tidal flat sediments, despite the considerable natural hazards such as sea-level rise and the rare but devastating storm surges. Extreme storm surges ended agricultural land use here in 1362 and 1634. They transformed cultivated land into a highly dynamic mudflat. This preserved earlier settlement and land use situations without significant recent anthropogenic influences. That makes this natural area so interesting for geoarchaeological research.

On Amrum, geoarchives were investigated where accumulation dominated in the past millennia: At the eastern edge of the dune belt near Meeram, a fen was identified under dune sands that grew up on Pleistocene sediments until the High Middle Ages. Under the Krümwaal on the eastern Geest, colluvia about 8,200 years old and a settlement pit were found. They prove an unexpected early settlement and land use in the transition from the Mesolithic to the Neolithic. The first construction of a shallow rampart at Krümwaal also took place earlier than expected according to the literature: more than 2,000 years ago. The first Krümwaal is presumably a deliberately constructed field or settlement boundary.

The exemplarily investigated sites prove the high spatial and temporal variability especially of the Late Holocene ecosystem development in an extremely vulnerable habitat, today's North Frisian Islands and the Wadden Sea.

## 1. Einführung

Zahlreiche Sturmfluten hatten während Mittelalter und Neuzeit an der Nordseeküste von den Niederlanden bis Dänemark landwirtschaftlich genutztes Kulturland in ein hochdynamisches Watt verwandelt und damit dort auch frühere Siedlungs- und Landnutzungssituationen ohne jüngere anthropogene Überprägungen konserviert. Dieses machte und macht den Raum so interessant und wichtig für die archäologische und geowissenschaftliche Küstenforschung. Insbesondere seit den 1960er Jahren wurde daher die mittelalterlich-neuzeitliche Siedlungs-, Landnutzungs- und Landschaftsgeschichte des hochvulnerablen Raumes an der Westküste von Schleswig-Holstein mit archäologischen, geoarchäologischen, bodenkundlichen, geophysikalischen und geologischen Methoden intensiv untersucht (vgl. z.B. Prange, 1965; Bantelmann, 1966; Higelke et al., 1976; Higelke et al., 1979; Hoffmann, 1980; Quedens et al., 1991; Bantelmann, 1992; Lorenzen-Schmidt & Pelc, 2000; Ahrendt, 2007; Kelletat, 2007; Meier, 2007; Rieken, 2008; Meier et al., 2013; Flemming et al. 2014; Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, 2015; Bork, 2020). Hinzu kommen vorzügliche zeitgenössische Quellen, die das Ausmaß und die Folgen von Sturmfluten vor allem seit der frühen Neuzeit präzise beschreiben (vgl. hierzu z.B. in Rieken, 2008).

Nachstehend wird der Forschungsstand insbesondere zur jungholozänen Landschaftsdynamik und Landnutzungsgeschichte zuerst allgemein für den Westen Nordfrieslands und dann für Pellworm und Amrum zusammengefasst.

### 1.1 Die pleistozäne und frühholozäne Klimadynamik und Geogenese

Während der der Gletschervorstöße der Saale-Kaltzeit vor etwa 150.000 bis 130.000 Jahren wurden im Nordwesten des heutigen Bundeslandes Schleswig-Holstein – in Nordfriesland – Substrate aus Skandinavien und dem Ostseebecken wesentlich weiter nach Westen transportiert und in größerer Mächtigkeit abgelagert als im Südwesten des Landes, im heutigen Dithmarschen (Meier, 2007; Behre, 2008; Meier, 2019; Meier et al., 2013).

Abgelagert wurden während der Saale-Kaltzeit zuerst Schmelzwassersande, darüber lehmige Geschiebemergel, kleinere Gerölle und auch größere Geschiebe („Findlinge“) als Grundmoräne und abschließend oftmals erneut Schmelzwassersande. Die Schmelzwässer schufen ausgedehnte Niederungen zwischen den Geestrücken. Rund 125.000 Jahre vor heute brach das Meer während der frühen Eem-Warmzeit in die Niederungen ein, weitete und vertiefte sie. Periglaziäre Prozesse überprägten die saalezeitlichen glazialen und glazifluvialen Ablagerungen oberflächennah während der sich anschließenden Weichsel-Kaltzeit. Sie bedingten die Durchmischung und bei ausreichender Hangneigung die hangabwärts gerichtete Bewegung der saalezeitlichen Substrate. Schmelzwässer erodierten einen Teil der Ablagerungen, ein anderer blieb u.a. auf Amrum als oberflächlich sichtbarer Geestkern mit saalezeitlichen glazialen bzw. glazifluvialen Ablagerungen und weichselzeitlichen periglazialen Bildungen bis heute erhalten. Das Resultat der kaltzeitlichen Prozesse sind vielfältige Landschaftsformen und -elemente (vgl. Müller-Wille et al. 1988; Quedens et al., 1991; Bantelmann, 1992, Meier 2001, 2007, 2019; Behre, 2008; Meier et al., 2013; Stephan, 2014).

Im frühen Holozän stieg der Meeresspiegel rasch an. Dann, vor etwa 5000 Jahren, als das Meer den heutigen äußersten Westen Nordfrieslands erreicht hatte, verlangsamte sich der Anstieg. Seitdem kam es mehrfach zu schwachen Transgressionen und Regressionen (Hoffmann 1980, 2004; Behre 2005, 2007, 2008; Ahrendt, 2007; Tillmann et al. 2013).

Das Ausmaß des durchschnittlichen Tidenhubs variiert aufgrund der spezifischen Topographie der Nordseeküste räumlich stark. An offenen Küstenabschnitten wie im Norden von Sylt bei List beträgt er durchschnittlich etwa 1,75 m. In trichterförmigen Abschnitten läuft die mittlere Tide bis zu 4 m hoch auf. Während einer Springtide ist die Flut mehrere Dezimeter höher. Die Tideströmung bewegt im Watt die an der Geländeoberfläche liegenden, schluff- oder sandreichen Substrate. Hauptsächlich entlang der Hauptgezeitenströme erodierte Substrate lagern sich in Bereichen mit geringeren Fließgeschwindigkeiten ab. Gemäß der an der Oberfläche dominierenden Korngröße wird der täglich zweimal überflutete Raum in das vorwiegend küstennahe, schluffreiche Schlick-, das Misch- und das meist dominierende, küstenfernere bzw. prielnähere, feinsandreiche Sandwatt differenziert. Der weit überwiegende Teil der Substrate wird intern im Watt und in den offenen, nicht eingedeichten Marschen umgelagert. Hinzu kommt der mineralische und organische Eintrag über die Flüsse sowie die Einwehung von Sanden.

Substratverluste können durch die Auswehung von Sanden aus trockengefallenen Wattflächen bei kräftigen Winden entstehen (vgl. Newig, 2004; Behre, 2000, 2008; Karius et al., 2011; Sander et al., 2011; Vogt et al., 2011; Tillmann, 2015a, 2015b; Meier, 2019).

## 1.2 Übersicht zu den Mensch-Umwelt-Interaktionen

Der Meeresspiegelanstieg und die Sturmfluten veränderten die Region. Die Wassermassen von Sturmfluten drangen besonders über die breiten Buchten weit in die dahinter landeinwärts liegenden Täler ein und schufen dort teilweise tiefe Prielsysteme. Die Wassermassen erodierten Geestkerne westlich von Sylt und Amrum vollständig, zahlreiche raumzeitlich hochdynamische Sandbänke entwickelten sich. Östlich verblieben Inseln mit ausgedehnten Wattflächen (vgl. Hoffmann 1980, 1985, 2004).

Menschen begannen den bis dahin weitgehend naturbelassenen, einzigartigen und hochvulnerablen Raum insbesondere aufgrund der marinen Ressourcen, dem Meereszugang und der hohen Bodenfruchtbarkeit des sand- und schluffreichen Watts und der Marschen intensiv zu nutzen, trotz des Meeresspiegelanstiegs, der Gefahr von schweren Sturmfluten und der daraufhin notwendigen, aufwendigen Anpassungs- und Schutzmaßnahmen (vgl. Bantelmann, 1939; Petersen & Rohde, 1977; Dittmann, 1999; Dette, 2000; Meier, 2001, 2019; Siedschlag, 2017).

Auf den schleichenden, während eines Menschenlebens nicht wahrnehmbaren Meeresspiegelanstieg und die zunehmenden Sturmfluten mussten die Menschen reagieren. Sie begannen schon vor etwa zwei Jahrtausenden auf den geringfügig höheren Bereichen der Marsch zunächst flache Wohnhügel hauptsächlich aus Klei und Mist zu errichten, die Warften. Diese wurden aufgrund des steigenden Meeresspiegels später immer weiter erhöht, während der Spätantiken Kleinen Eiszeit zeitweise verlassen und ab dem 7./8. Jahrhundert erneut genutzt. Auf den Halligen blieben zahlreiche Warften bis heute erhalten. Andere, leicht höher gelegene fruchtbare Marschen wurden ab dem 11. Jahrhundert mit zuerst recht niedrigen Deichen umgeben und landwirtschaftlich genutzt. Getreide wurde angebaut, Tiere wurden gehalten. Doch wird die Verwundbarkeit des Raums bald deutlich. So wurden die Deiche während großer Sturmfluten z. B. im Januar oder Februar 1216, vom 15. bis 17. Januar 1362, im Dezember 1593,



in der Nacht vom 11. auf den 12. Oktober 1634, am 24./25. Dezember 1717 und vom 3. bis zum 5. Februar 1825 überflutet und zerstört (vgl. Meier, 2012; Meier et al., 2013; Hadler et al., 2018). Nicht selten folgten Nahrungsmangel, Hunger und Seuchen auf die Überflutung der intensiv genutzten Marschen. Zerstörte Deiche wurden, wo es möglich war, instandgesetzt, anschließend erhöht und immer wieder zerstört – mit verheerenden Folgen für die Menschen, die hinter den Deichen lebten. Manche Marschen gingen dauerhaft als Kulturreich verloren. Sie bilden zwischen den verbliebenen Inseln und der östlich anschließenden Jütischen Halbinsel mit den einzigartigen, bis heute manchmal gut sichtbaren, manchmal begrabenen Siedlungs- und Landnutzungsarchiven das geologisch und ökologisch hochdynamische Wattenmeer. Es hat sich ein breiter und weltweit einmaliger Küstenraum mit vielfältigen Funktionen und einer hohen Bedeutung für Menschen, Tiere und Pflanzen entwickelt, der aufgrund seiner hohen Biodiversität seit 1985 als Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer geschützt ist (Ahrendt, 2007).

In den breiten Niederungen zwischen den Kögen, den eingedeichten Marschen, bewirkten die ansteigenden Meeres- und damit landeinwärts Grundwasserspiegel das Wachstum von Niedermooren. Diese wurden durch den weiteren Anstieg des Meeresspiegels überflutet und mit schluffigen und schluffig-tonigen Sedimenten bedeckt. In Regressionsphasen wuchsen neue Niedermoore auf den marinen Sedimenten auf.

Ohne die Eingriffe der Menschen in den vergangenen Jahrtausenden wäre das Meer sehr viel weiter in das Binnenland eingedrungen. Einige Inseln (wie Pellworm) und Halbinseln würden nicht mehr existieren oder wären sehr viel kleiner. Das Watt würde weit in die heute eingedeichten Niederungen hineinreichen, an deren Rändern und östlichen Abschnitten würden Niedermoore wachsen. Auf den dazwischen liegenden nicht stark vernässten Geeststandorten würden vorwiegend Buchen-Eichen-Mischwälder gedeihen (Dierßen, 2004).

Tatsächlich schützen das Watt und die auch durch Eindeichungen bis heute erhalten gebliebenen oder wieder gewonnenen Inseln das östlich anschließende Festland Nordfrieslands, da sie auch während großer Sturmfluten einen erheblichen Teil der Energie der Gezeiten aufnehmen (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, 2015).

### 1.3 Pellworm

Pellworm ist eine vom Watt umgebene Marschinsel. Im Watt um Pellworm finden sich vielfältige Relikte von Kulturlandschaften, die Sturmfluten seit dem Hochmittelalter zerstört haben. Bis zur ersten Großen Mandränke im Jahr 1362 existierte hier eine größere Insel mit fünf Harden und 22 Kirchspielen. Die Lundenberg- und die Wiriksharde gingen im Januar 1362 verloren. Die übrigen Harden wurden wieder eingedeicht und zu einer breiten, hufeisenförmigen Insel verbunden: der rund 220 km<sup>2</sup> großen Insel Strand, die auch als Alt-Nordstrand bezeichnet wird. Die zweite Große Mandränke zerriss in der Nacht vom 11. auf den 12. Oktober 1634 Strand. Es verblieben nach erneuten äußerst aufwendigen und schwierigen Eindeichungen die beiden Marschinseln Pellworm im Westen und Nordstrand im Osten mit dem dazwischenliegenden Norderheverstrom. Spätere Sturmfluten trafen die beiden Inseln erneut. Erst die massiven Deicherhöhungen nach der Sturmflut vom 15./16. Februar 1962 boten Sicherheit gegen extreme Sturmfluten. Heute umgibt die 37 km<sup>2</sup> kleine Insel Pellworm ein hoher und gut 25 km langer Deich, dessen Krone im Osten bei NHN +7,40 m und an den anderen Deichabschnitten bei HNH +8,00 m liegt. Beweidetes Dauergrünland dominiert heute auf Pellworm die Flächennutzung (Quedens et al., 1991; Bantelmann, 1992; Lorenzen-Schmidt & Pelc, 2000; Grimm, 2017; Meier, 2012; Meier et al., 2013). Unmittelbar westlich und nördlich von Pellworm liegen Relikte der 1634 untergegangenen Insel Strand. Sie sind hier nur fragmentarisch untersucht (vgl. Bauer et al. 2009, Bahnsen et al., 2014).

### 1.4 Amrum

Amrum hat heute ohne den Kniepsand nur noch eine Größe von rund 20,5 km<sup>2</sup>. Die längliche Insel besitzt einen ausgedehnten Geestkern. In ihrem westlichen Teil liegt ein breiter Dünengürtel mit einer Fläche von etwa 9 km<sup>2</sup> auf der Geest. Westlich schließt sich der bis zu einem Kilometer breite Kniepsand an. Letzterer ist eine junge Sandbank mit einer Ausdehnung von heute fast 10 km<sup>2</sup>, die nur bei Sturmfluten überspült wird. Östlich des Geestkerns befinden sich schmale Marschen (Quedens et al., 1991).

Die wenigen erhaltenen Großsteingräber belegen, dass der Raum, in dem heute die Insel Amrum liegt, bereits im Neolithikum besiedelt war. In der Bronzezeit angelegte Grabhügel haben sich bei

Steenodde erhalten. Zwischen ihnen liegen mittelalterlich-frühneuzeitliche Relikte von Ackerbeeten. Insbesondere unter den Dünen und in den Dünentälern wurden eisenzeitliche Siedlungs- und Landnutzungsrelikte wie Gräberfelder, Pflugspuren und Ackerbeete gefunden. Die agrarische Landnutzung ließ die sandreichen Substrate bereits in der Eisenzeit verarmen. Bis in das frühe Mittelalter bildete sich in ihnen ein Podsol. Erst danach, sehr wahrscheinlich ab dem hohen Mittelalter, wurden im westlichen Teil der Geest die Dünen aufgeweht. Starke Strömungen führten Sandbänke an die Westküste Amrums, die während des Niedrigwassers trockenfielen. West- und Nordwestwinde bliesen Sand auf die Geest und formten allmählich den Dünengürtel. Östlich des Dünengürtels wurde die Weidewirtschaft mit Heidevegetation bis in die jüngere Neuzeit fortgeführt. Im 19. und 20. Jahrhundert brachen Bewohner große Teile des Heidegebietes um, um Ackerbau zu betreiben. Die starken Sandbewegungen aus dem Dünengürtel nach Osten auf die restlichen Heide- und die neuen Ackerflächen führten nach dem Zweiten Weltkrieg zu dem Entschluss, einen schmalen Streifen unmittelbar östlich der Dünen aufzuforsten. Hier wurden von 1948 bis 1965 Schwarzkiefern (*Pinus nigra*), Sandbirken (*Betula pendula*), Japanische Weiß-Birken (*Betula platyphylla*), Rot-Eichen (*Quercus rubra*) und Ebereschen (*Sorbus acuparia*) gepflanzt. Östlich dieses jungen Waldgürtels werden große Teile der Geest weiter landwirtschaftlich genutzt. (Quedens et al., 1991).

Auf Amrum befinden sich auch lineare Bodendenkmäler, darunter der Krümwaal im östlichen Zentrum der Insel. Ein morphologisch markanter und gut erhaltener Wall verläuft etwa von der Windmühle in Nebel über die Schule von Nebel weiter nach Osten. Im letzten Abschnitt bis zur Küste in Steenodde ist er nur noch schwach als Erhebung zu erkennen. Sein Aufbau, sein Alter und seine Funktion sind nicht bekannt. Vermutet wird, dass der Krümwaal aus der Wikingerzeit stammt (Quedens et al., 1991).

## 1.5 Forschungsfragen

An der Westküste Schleswig-Holsteins haben sich also während des Jungholozäns sehr verschiedenartige Landschaftseinheiten weiterentwickelt, darunter die Geestkerne der nordfriesischen Inseln mit jungpleistozänen Sedimenten und das umgebende Watt in ehemaligen Kulturlandschaften. Definierte, kleine Ausschnitte dieser beiden Raumeinheiten werden in dieser Dissertation detailliert untersucht, um die anthropogene Formenvielfalt und ihre jungholozäne Prozessdynamik zu rekonstruieren.

Die folgenden Forschungsfragen betreffen das Watt: Welche Relikte anthropogener Nutzung liegen in einem definierten kleinen, küstennahen Ausschnitt des Watts im Bereich der Wüstung Waldhusen nördlich von Pellworm? Wie haben bedeutende Sturmfluten, besonders die beiden Großen Mandränken vom 15. bis zum 17. Januar 1362 und am 11./12. Oktober 1634 diesen Landschaftsausschnitt verändert?

Für einen definierten kleinen Landschaftsausschnitt eines Geestkerns ergeben sich die folgenden Forschungsfragen: Welche Relikte anthropogener Nutzung liegen südöstlich von Nebel auf Amrum? Wie haben sich diese bis heute verändert? Da der Krümwaal dieses Gebiet durchzieht, ist zu fragen: Wann wurde der Krümwaal errichtet? Hat er sich in mehreren Phasen gebildet? Wie haben der Wall und seine unmittelbare Umgebung sich bis heute durch welche Einflüsse verändert? Unter den Dünen im Nordwesten der Insel – das Gebiet bei der Vogelkoje zwischen Nebel und Norddorf wird als Meeram bezeichnet – werden ehemalige Feuchtgebiete vermutet. Wie haben diese sich seit der Dünenbildung verändert? Haben sich Relikte der Feuchtgebiete bis heute erhalten?

Die Beantwortung dieser Fragen ist auch relevant, um mögliche zukünftige Entwicklungen besser abschätzen zu können – insbesondere Entwicklungen, die durch den anthropogenen Klimawandel eintreten könnten.

## 1.6 Die Struktur der Arbeit

Zur Beantwortung der genannten Forschungsfragen wurde einleitend der Forschungsstand zur Genese des westlichen Nordfriesland mit den Schwerpunkten Pellworm und Amrum zusammenfassend erläutert. Das zweite Kapitel („Methoden“) beschreibt sowohl die Geländearbeiten mit den verwendeten Geräten und Hilfsmitteln, die Arbeiten im Labor wie die Korngrößenanalyse und die Datierungen, die für die Interpretation unerlässlich sind. Die Lage der Untersuchungsstandorte bei Pellworm und auf Amrum wird im dritten Kapitel anhand einer Karte visualisiert.

Die Ergebnisse der acht, heute im Watt nördlich von Pellworm in zwei Bereichen der ehemaligen Flur Waldhusen untersuchten Profile werden im vierten Kapitel einschließlich der Feld- und Labordaten sowie der Stratigraphie detailliert vorgestellt. Gegenstand des fünften Kapitels sind die Forschungsergebnisse auf Amrum, insbesondere am Krümwaal südöstlich von Nebel und in den Dünentälern von Meeram. Für die untersuchten Standorte im Watt bei Pellworm und auf Amrum werden die Feld- und Labordaten sowie die Stratigraphie detailliert präsentiert.

Im sechsten Kapitel erfolgen eine kurze übergreifende Analyse und Interpretation der Befunde.

## 2 Methoden

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden Bohrungen und Grabungen in den Untersuchungsgebieten Waldhusen bei Pellworm und auf Amrum durchgeführt. Die Proben wurden im Labor analysiert. Nachstehend werden die eingesetzten Methoden vorgestellt.

### 2.1 Gelände

#### 2.1.1 Bohrungen

Die Kernbohrungen auf Amrum wurden mit einem Presslufthammer BH 23 der Firma Wacker Neuson ausgeführt. Der Bohrhammer hat ein Gewicht von 23 kg und wird mit Hilfe eines Schlagkopfes und einem Bohrgestänge mit einer Rammkernsonde der Firma Sitz (1 m Länge, 63 mm Durchmesser) mit einem innenliegenden PVC-Rohr verbunden. Das PVC-Rohr hat einen Außendurchmesser von 50 mm. Am unteren Ende wird das PVC-Rohr mit einem Kernfänger versehen, der das Herausrutschen des gewonnenen Bohrkerns verhindert. Auf die Rammkernsonde wird ebenfalls am unteren Ende eine innen offene Bohrspitze (Schneide) aufgeschraubt, die sich in den Boden schneidet und durch die das Bodenmaterial in das PVC-Rohr gedrückt wird. Für die folgenden Meter wird jeweils eine Verlängerungsstange aus Stahl angeschraubt, an der der Bohrhammer mit dem Schlagkopf befestigt wird. Die Tiefe der Bohrungen variierte zwischen 1 bis 3 m.

Für das Ziehen der Bohrkerne wird eine Kugelklemme benutzt, die mit einem hydraulischen Ziehgerät (8 t Zugkraft) verbunden ist. Nach der Bergung des PVC-Rohrs wird dieses der Länge nach mit einer elektrischen Kreissäge in zwei Hälften gesägt. Noch im Gelände findet eine erste Beschreibung des Bohrkerns nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 von 2005 statt (Eckelmann, 2005). Die Farbe der feldfrischen Böden wird mit Hilfe der Munsell Soil Colour Chart (Munsell, 2000) bestimmt.

Die geographische Lage der Bohrungen wurde mit einem GNSS-System GS 09 (Global Navigation Satellite System) der Firma Leica eingemessen.

### 2.1.2 Grabungen

Neben den Bohrungen wurden Grabungen durchgeführt. Am Krümwaal auf Amrum mit einem Kleinbagger und Spaten, an den Profilen im Watt vor Pellworm mit Spaten. Hierfür wurde der zu beprobende Bereich zuerst mit Holzpflocken abgesteckt, dann vermessen und schließlich mit Bagger bzw. Spaten ausgegraben und abschließend aufgenommen und beprobt.

Bei den Profilen im Watt waren die Gezeiten zu berücksichtigen. Für das Öffnen eines Profils, dessen Aufnahme und die Beprobung blieben nur etwa vier Stunden, bevor die Flut die Grube erreichte. Da an einigen längeren und tieferen Profilen die Zeit für die notwendigen Arbeiten nicht ausreichte, mussten sie während des nächsten Niedrigwassers zuerst wieder mit Eimern ausgeschöpft und dann die Wände gereinigt werden, damit das Profil abschließend bearbeitet werden konnte.

Nach dem Graben wurden die Profilwände mit der Hilfe von Ziehhacken begradigt, bis alle Schichten und Merkmale im Profil gut zu erkennen waren und eine Profilaufnahme stattfinden konnte.

Für die Profilaufnahme wurde eine horizontale Linie (die „Nulllinie“) auf der gesamten Profillänge gespannt und befestigt. Die Schicht- und Horizontgrenzen sowie die weiteren Befunde und Funde wurden ausgehend von der Nulllinie eingemessen. Das Profil wurde auf Millimeterpapier übertragen, meist im Maßstab 1:10 und bei längeren homogenen Profilen teilweise überhöht.

Aus jeder Schicht wurde eine Beutelprobe mit Sediment unterschiedlichen Gewichts für die Laboranalyse und zum Schlämmen für eventuell datierbares Material Eimerproben entnommen.





**Abbildung 1: Geoarchäologische Grabungen um Waldhusen nördlich von Pellworm (Foto: H.-R. Bork)**



**Abbildung 2: Geoarchäologische Grabungen um Waldhusen nördlich von Pellworm (Foto: H.-R. Bork)**



## 2.2 Datierungen

Für die Radiokarbondatierungen ( $^{14}\text{C}$ -AMS) wurden vier Proben aus Waldhusen bei Pellworm (Holzkohle und Pflanzensamen) und vier Proben vom Krümwaal-Profil KRW\_00 auf Amrum (Holzkohle und Getreidekörner) ausgewählt. Die Datierungen wurden im Poznan Radiocarbon Laboratory in Polen vorgenommen. Die Ergebnisse wurden mit dem Programm OxCal V4.2 kalibriert (Bronk Ramsey, 1995).

## 2.3 Labor

Von den zwei vorhandenen Kernhälften wurde je eine ungestört verpackt und in einem Kühlcontainer als Referenz aufbewahrt. Die zweite Hälfte wurde für die Analysen im Labor verwendet. Aus dieser Hälfte wurden die im Kernschnitt sichtbaren Schichten getrennt und das Substrat in Plastikbeutel gefüllt. Die Proben wurden im Trockenschrank für einige Tage bei ca. 40 °C getrocknet und danach durch ein Normsieb (Firma Retsch) mit der Maschenweite von 2mm gesiebt. Folgende Komponenten wurden getrennt:

- Feinboden ( $\leq 2\text{mm}$ )

- Grobboden ( $\geq 2\text{mm}$ )

- Artefakte

- Knochen

- Holz, Holzkohle

- Pflanzenreste

Die jeweils enthaltenen Anteile wurden gewogen und die Prozentanteile bestimmt (Khamnueva, 2017).

Des Weiteren wurden die folgenden Messungen im Labor durchgeführt:

- Glühverlust bei 550 °C

- C/N Anteile (nur bei den Pellworm-Proben)

- pH-Werte

- Korngrößenanalysen

Über den Glühverlust wurde der Gehalt an organischem Material in der Probe bestimmt. Es ist davon auszugehen, dass organisches Material bei einer Temperatur von 550 °C vollständig verbrannt wird. Für die Messung des Glühverlustes wurden zunächst Porzellantiegel gereinigt und bei 105 °C getrocknet. In die Tiegel wurden danach Bodenproben mit einem Gewicht von ca. 3 g eingewogen. Die Proben wurden in einem Trockenschrank über Nacht bei 105 °C und danach in einem Muffelofen bei 550 °C für zwei Stunden erhitzt. Nach jedem Erhitzen wurden die Proben in einem Exsikkator gekühlt und anschließend abgekühlt gewogen. Das Gewicht der Proben wurde nach jedem Schritt notiert, um den Gewichtsverlust zwischen den Erwärmungsvorgängen bei 105 °C und 550 °C berechnen zu können. Der Glühverlust wird in Gewichtsprozent angegeben (Khamnueva, 2017).

Zur Messung des C/N-Verhältnisses bei den Proben aus Waldhusen wurden makroskopisch sichtbare Pflanzenreste entfernt und das Material über 30 Sekunden in einer Achat-Vibrationsscheibenmühle zu Pulver gemahlen. Die Messung der Proben erfolgte durch Spontanverbrennung mit anschließender chromatographischer Trennung mit einem Euro EA-CHNSO Element Analyser (Khamnueva, 2017).

Der pH-Wert wurde in Boden-0,01 mol Calciumchlorid-Suspension im Volumenverhältnis 1:5 (Boden:0,01M $\text{CaCl}_2$ ) mit der pH-Elektrode SenTix 41 und dem Mehrparameter-Taschenmessgerät 3320 der Firma WTW gemessen.

Der pH-Wert gestattet nicht nur eine Differenzierung des chemischen Zustands der untersuchten Substrate. Er gibt auch Hinweise auf die Konservierungsbedingungen für natürliche Materialien und Artefakte, Knochen usw. innerhalb der Lagerstätte (Khamnueva, 2017).

Die Korngrößenfraktionen des Feinbodens wurden mit einem Mastersizer 2000 der Firma Malvern Panalyticals im Labor des Geographischen Instituts der CAU gemessen. Zur Vorbereitung des Bodens (nach DIN-Norm 18123 2011-04, Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung) muss die organische Substanz und evtl. enthaltene Carbonate zuerst zerstört werden. Um die organische Substanz zu zerstören, wurden ca. 0,8 bis 1,2g Boden in 50ml Zentrifugenröhrchen eingewogen und in 5ml-Schritten 35%iges Wasserstoffperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) hinzugegeben. Carbonate waren weder in den Waldhusen- noch in

den Amrumproben enthalten. Wenn keine Reaktion auf das  $\text{H}_2\text{O}_2$  mehr erfolgt, ist der organische Anteil in der Probe zerstört und das  $\text{H}_2\text{O}_2$  kann abzentrifugiert werden. Die Probe wurde danach mindestens zweimal mit destilliertem Wasser gespült. Anschließend wurden zur Dispergierung der einzelnen Körner 0,1M Natriumpyrophosphat ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ) und etwa 10 ml destilliertes Wasser hinzugegeben. Die Lösung wurde 16 Stunden über Kopf geschüttelt. Die Korngrößenverteilung konnte nun gemessen werden. Der Mastersizer 2000 von Malvern Panalyticals besitzt einen Messbereich von  $0,02\text{ }\mu\text{m}$  bis  $2000\text{ }\mu\text{m}$ , eine Probe wird in 70 Fraktionen unterteilt.

Der Messfehler des Instruments ist in allen Korngrößenfraktionen sehr gering und wurde daher nicht weiter berücksichtigt. Die Standardabweichungen lagen bei 0,002 % in der Ton-Fraktion, bei 0,03 % in den Schluff-Fraktionen und bei 0,1 % in den Sandfraktionen (Khamnueva, 2017).

Die mit dem Mastersizer erzielten Messergebnisse wurden auf der Grundlage der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 (Eckelmann, 2005) in standardisierte Bodenartenklassen überführt.

## 2.4 Software

Für die Statistische Auswertung und die Erstellung der Graphiken wurde die Version 4.0.3 und 4.0.4 des Programms R mit der Programmierumgebung Rstudio verwendet, für die graphischen Darstellungen ArcMap Version 10.5.1, für die Literaturverwaltung Medeley 1.19.4 und für alles Weitere das MS Office Paket 2016.

### 3 Lage der Untersuchungsgebiete

In der ehemaligen Flur Waldhusen nördlich von Pellworm wurden in zwei benachbarten Gebieten zusammen acht Standorte untersucht. Die Lage der beiden Gebiete zeigt Abbildung 3 unten. Die beiden Untersuchungsgebiete mit jeweils 2 Profilen auf Amrum sind auf dieser Abbildung oben mit KRW (Krümwaal) und MER (Meeram) bezeichnet.

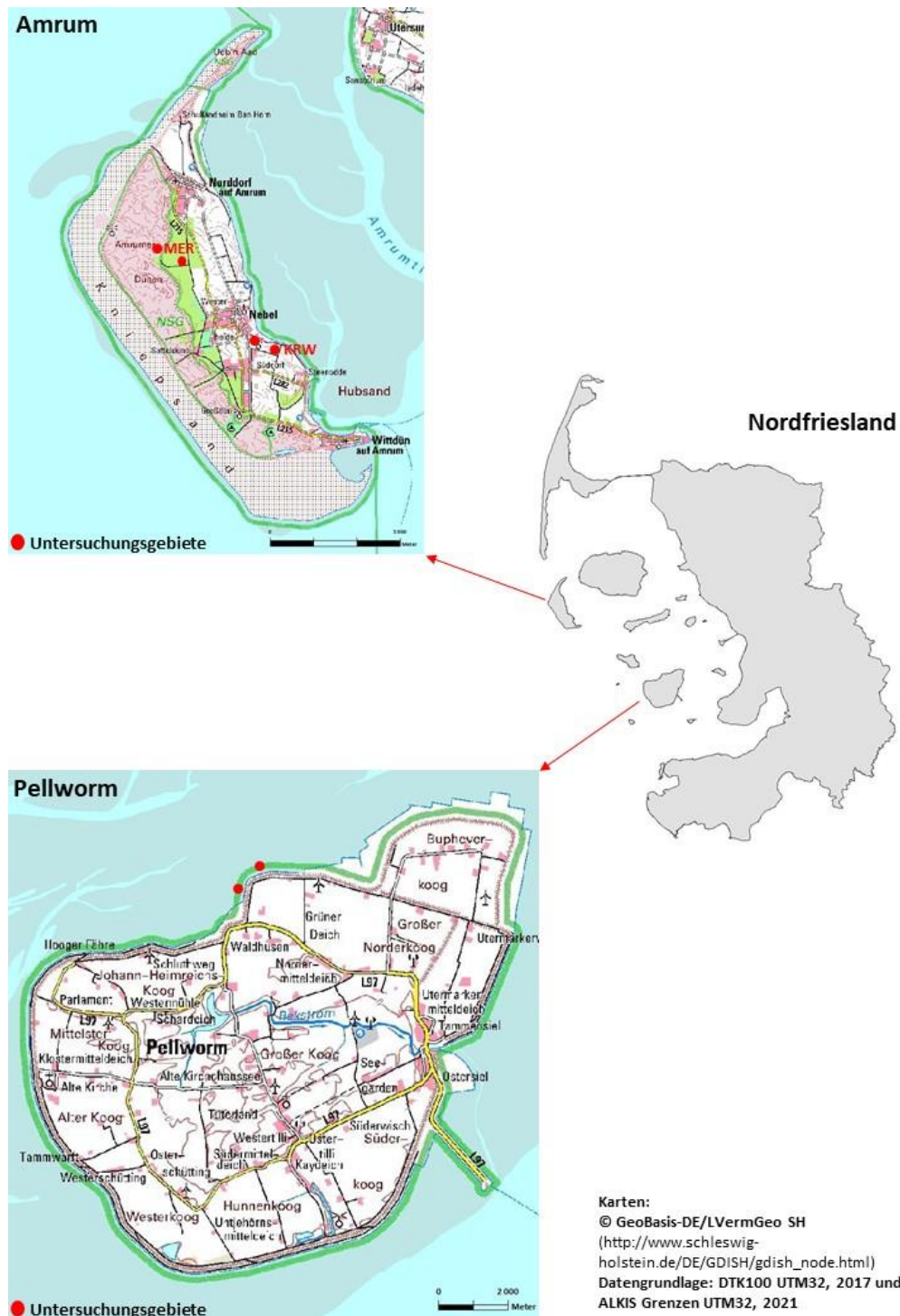


Abbildung 3: Lage der Untersuchungsgebiete

## 4 Forschungsarbeiten um Waldhusen bei Pellworm

### 4.1 Lage der Profile

Die Lage der acht in der ehemaligen Kulturlandschaft von Waldhusen nördlich von Pellworm bearbeiteten Profile zeigt Abbildung 4. Fünf Profile liegen im östlichen (PRP, PG2P, PB1P, PB2P, PB3P), drei Profile im westlichen Untersuchungsgebiet von Waldhusen (PWAP, PWP, PTP).



Abbildung 4: Lage der Profile in der Flur Waldhusen bei Pellworm

Nachstehend werden die Stratigraphien, die weiteren Feld- und die Laborbefunde der acht Profile von Waldhusen vorgestellt.

#### 4.2 Stratigraphie PWAP (Pellworm, Dauergrünland)

Das Profil PWAP liegt im westlichen Untersuchungsgebiet von Waldhusen. Es ist 31,7 m lang und bis zu 0,8 m tief. Das Profil wurde am 31.5.2017 und am 1.6.2017 in ostwestlicher Richtung aufgedigelt, aufgenommen und beprobt.

Der Standort PWAP lag längere Zeit im Einflussbereich der Gezeiten. In dieser Phase wurde ein mächtiges Kleipaket abgelagert. Der kalkhaltige Klei hat einen Tongehalt von 9,5 %, einen hohen Schluffgehalt von 74,3 % und einen Sandgehalt von 16,2 %. Er besitzt heute einen pH-Wert von 7,6, einen Karbonatgehalt von 1,6 % und einen Gehalt an organischer Substanz (Glühverlust 550 °C) von 7,9 %.

In der auf die Kleisedimentation folgenden Regressionsphase wurde der durch die Kleiablagerung leicht erhöhte Standort selbst bei Sturmfluten nicht mehr überflutet. Vegetation konnte sich ansiedeln und ein Humushorizont (I fAh1) entwickelte sich in einem vorwiegend feuchten Milieu, der schließlich im Mittel etwa 5 cm und maximal 14 cm mächtig war. Der heute stark verdichtete Humushorizont versauerte leicht, der pH-Wert sank; er hat heute einen Wert von 6,4. Durch eine sehr viel spätere, auf eine Transgression zurückzuführende Besiedlung des Standortes mit Schnecken, Muscheln und Wattwürmern, die Reste von Kalkskeletten einarbeiteten, ist der Kalkgehalt mit einem Wert von 8,9 % heute hoch. Die organische Substanz ist sehr stark zersetzt. Der Gehalt an organischer Substanz (Glühverlust 550 °C) liegt bei 40,2 %. Das anorganische Substrat des Humushorizontes hat einen Tongehalt von 11,7 %, einen hohen Schluffgehalt von 73,2 % und einen Sandgehalt von 15,1 %.

Der Humushorizont wurde während einer Sturmflut überflutet. Ein bis zu einem Zentimeter mächtiges Schluffbändchen lagerte sich dabei an der Geländeoberfläche auf dem Ah-Horizont ab. Es besitzt einen Tongehalt von 9,5 %, einen hohen Schluffgehalt von 79,8 % und einen Sandgehalt von 10,7 %. Der pH-Wert liegt dort heute bei 6,2, der Kalkanteil bei 4,5 % und der Gehalt an organischer Substanz (Glühverlust 550 °C) bei 37 %. Da dieses Sturmflutsediment fast

vollkommen ungestört auf dem Humushorizont I fAh1 aufliegt, ist davon auszugehen, dass die Gehölzvegetation, die zur Bildung des Humushorizontes geführt hatte, schon vor dem Sturmflutereignis nicht mehr vorhanden war.

Nach dem Sturmflutereignis bildet sich auf dem Schluffbändchen erneut ein Humushorizont (II fAh2) an dem weiterhin sehr feuchten Standort, der im Mittel 8 cm und maximal 13 cm mächtig ist. Sein Gehalt an organischer Substanz (Glühverlust 550 °C) liegt heute bei sehr hohen 54,2 %. Das anorganische Substrat des Humushorizontes besitzt einen Tongehalt von 2,2 %, einen Schluffgehalt von 38,4 % und einen hohen Sandgehalt von 59,4 %. Der vor allem auf Muschelbruchstücke und Schneckenskelette zurückzuführende sehr hohe Kalkgehalt liegt bei 31,3 %.

Im oberen Humushorizont II f Ah 2 wurden die Großreste untersucht. Ein Fragment eines verkohlten Blatts wurde identifiziert und im Poznań Radiocarbon Laboratory radio-kohlenstoffdatiert (Probe Poz. 98065). Das Blatt besitzt demnach ein Alter von 1200-1050 cal BC (1σ). Es datiert damit in die späte Bronzezeit. Dieses hohe Alter war nicht erwartet worden. Um 1000 BC lag der Meeresspiegel aufgrund einer ausgeprägten Regression deutlich tiefer als heute und als davor in der mittleren Bronzezeit. Es überrascht, dass sich der Humushorizont über einen derart langen Zeitraum an der Geländeoberfläche weitgehend ungestört erhalten hat.

In dem oberen Humushorizont sind im vertikalen Profil gut sichtbare, schmale, vorwiegend 7 bis 12 cm, maximal 13 cm tiefe kerbenförmige Strukturen zu erkennen, die sich horizontal an der Geländeoberfläche zeitweise gut sichtbar mehr oder weniger gerade verlaufend fortsetzen. Zwei Kerbenpaare besitzen jeweils einen horizontalen Abstand von 81 bis 82 cm. Aufgrund des Verlaufs und der Form der Spuren dürfte es sich um die Spuren von Karrenrädern handeln, die in den feuchten Schlick eingesunken waren. Die Achsbreite betrug in zwei Fällen etwas mehr als 80 cm. In anderen Fällen wurden auch Karren mit nur einem Rad genutzt.

In etwa zeitgleich zum Befahren mit den Karren wurden von Menschenhand drei Gräben eingetieft. Der Graben 1 ist 48 cm tief und 120 cm breit, der Graben 2 ist 53 cm tief und 70 cm breit, der Graben 3 ist 73 cm tief und beachtliche 228 cm breit. Die Gräben dienten offensichtlich

der Entwässerung des Standortes, um beispielsweise eine Beweidung des Standortes zu ermöglichen. Hinweise auf Ackerbau wie Pflugspuren gibt es an diesem Standort nicht.

Der westlichste der drei Gräben ist im unteren Teil verfüllt mit einem Substrat, das einen Tongehalt von 7,8 % aufweist, einen hohen Schluffgehalt von 72,0 % und einen Sandgehalt von 20,2 %. Der Gehalt an organischer Substanz (Glühverlust 550 °C) liegt 19,5 %, der Kalkgehalt bei 2,7 %. In dieser unteren Füllung befinden sich Pflanzenreste. Die Bodentextur der oberen Grabenfüllung setzt sich zusammen aus 7,0 % Ton, 62 % Schluff und 31 % Sand. In dieser Grabenfüllung liegt der Gehalt an organischer Substanz (Glühverlust 550 °C) bei 17,3 % und der Gehalt an Kalk, ähnlich wie bei der unteren Grabenfüllung, bei 2,8 %.

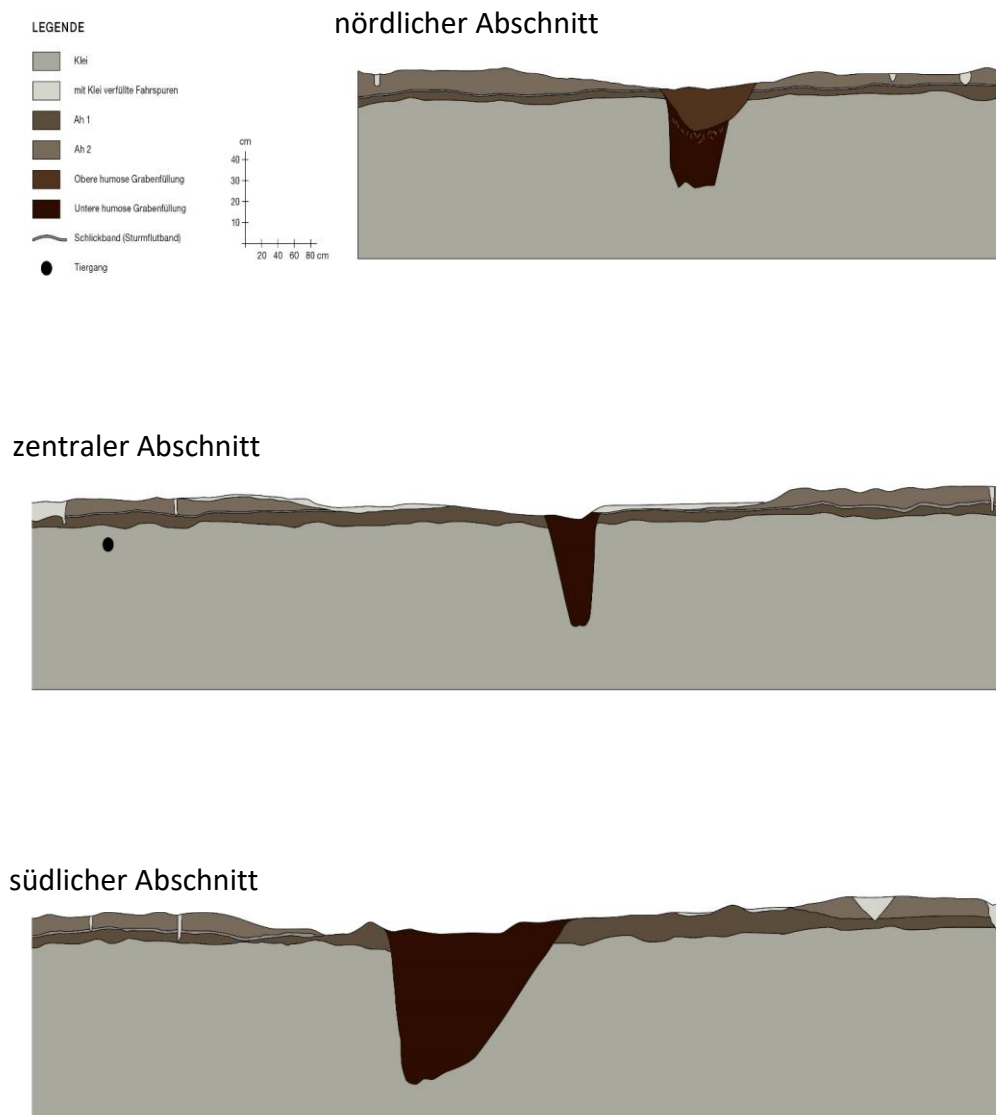
#### **Stratigraphie des Profils PWAP**

- |          |   |
|----------|---|
| Phase 1: | Ablagerung von Klei I Cv (schwach toniger Schluff)  |
| Phase 2: | Bildung des Humushorizontes I Ah 1 (in dem schwach tonigen Schluff, der in Phase 1 abgelagert worden war), wahrscheinlich in Dauergrünland  |
| Phase 3: | Ablagerung eines bis 1 cm mächtigen Schlickbandes (schwach toniger Schluff) auf I Ah1, durch eine Sturmflut (Sturmflutband)   |
| Phase 4: | Bildung eines zweiten Humushorizontes II Ah 2 (mittel schluffiger Sand), wahrscheinlich in Dauergrünland  |
| Phase 5: | Befahren mit Karren, deren Räder meist 7 bis 12 cm, maximal 13 cm in den II Ah 2 einsinken, wahrscheinlich zeitgleich Anlage der Gräben 1 bis 3 (Graben 1: 48 cm tief, 120 cm breit, Graben 2: 53 cm tief, 70 cm breit, Graben 3: 73 cm tief, 228 cm (!) breit). In Graben 1 liegen Pflanzenreste |
| Phase 6: | Füllung der drei Gräben mit Klei (oberer und unterer Bereich der Graben-füllung: sandiger Schluff)  |
| Phase 7: | Ablagerung eines sandreichen Schlickbandes an der rezenten Geländeober-fläche (schwach schluffiger Sand), insbesondere von -30 cm bis +300 cm Profillänge, sowie von 470 cm bis 690 cm sowie von 1780 cm bis 1820 cm sowie von 1860 cm bis 1920 cm Profillänge (jüngste Bildung)                  |

Ein geringmächtiges, bis zu 1 cm mächtiges sandreiches Bändchen lagerte sich während Phase 3 ab. Es besitzt einen Tongehalt von 2,5 %, einen Schluffgehalt von 24,8 % und einen Sandgehalt von 72,8 %. Es ist damit das sandreichste Substrat des Profils PWAP. Der obere Humushorizont wurde während mehrerer Sturmfluten überflutet.



Da diese Schicht den täglichen Gezeiten und immer wieder auftretenden Sturmfluten ausgesetzt ist, kommt es hier kaum zu einer Anreicherung von organischem Material. Der Gehalt an organischer Substanz (Glühverlust 550 °C) ist daher sehr gering und liegt bei 2,8 %. Auswaschungsprozesse führen ebenso zu einem geringen Kalkgehalt von 1,7 %.



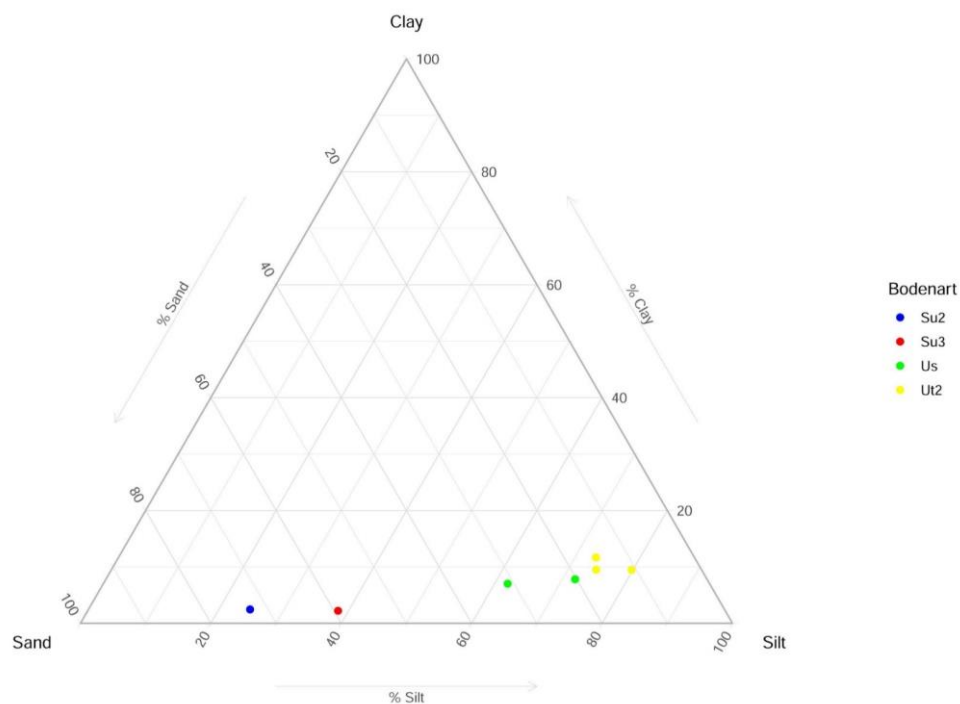
**Abbildung 5: Profilzeichnung PWAP (Graphik: D. Kramer)**

Probe	pH	N% gesamt	C% gesamt	Karbonate %	organ. Subst. %
GOF (Schlick)	7,9	0,08	1,3	1,7	2,8
II fAh2	6,4	1,6	26,5	31,3	54,2
Sturmflutband	6,2	1,0	17,4	4,5	37,0
I fAh1	6,4	1,2	19,9	8,9	40,2
Klei unterhalb I fAh1	7,6	0,4	9,6	1,6	7,9
Grabenfüllung oben	6,7	0,5	8,9	2,8	17,3
Grabenfüllung unten	7,0	0,6	10,4	2,7	19,5

**Tabelle 1: Laboranalysen PWAP**

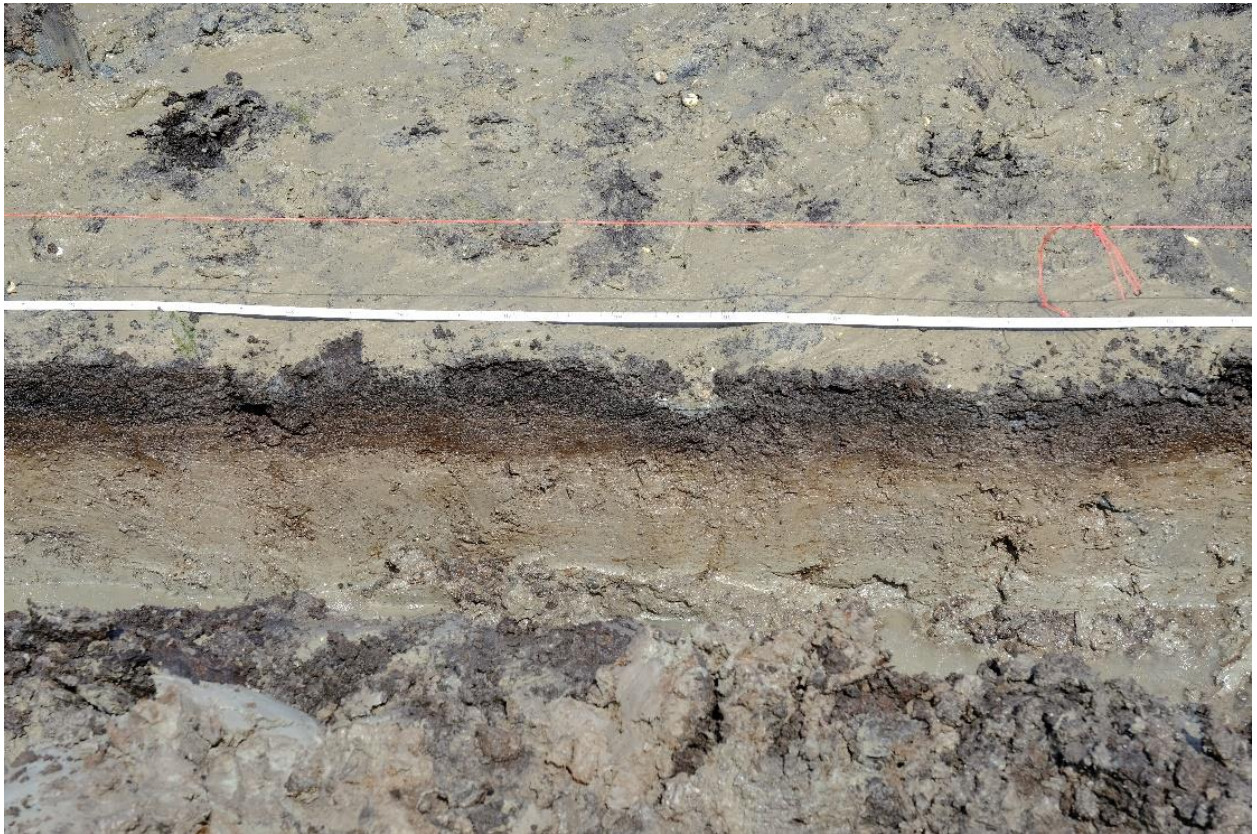
Probe	Ton %	Schluff %	Sand %	Symbol	Bezeichnung
GOF (Schlick)	2,46	24,79	72,75	Su2	schwach schluffiger Sand
II fAh2	2,22	38,39	59,39	Su3	mittel schluffiger Sand
Sturmflutband	9,48	79,78	10,74	Ut2	schwach toniger Schluff
I fAh1	11,67	73,23	15,10	Ut2	schwach toniger Schluff
Klei unterhalb I fAh1	9,50	74,34	16,16	Ut2	schwach toniger Schluff
Grabenfüllung oben	7,02	62,01	30,97	Us	sandiger Schluff
Grabenfüllung unten	7,80	71,96	20,23	Us	sandiger Schluff

**Tabelle 2: Bodenarten PWAP**

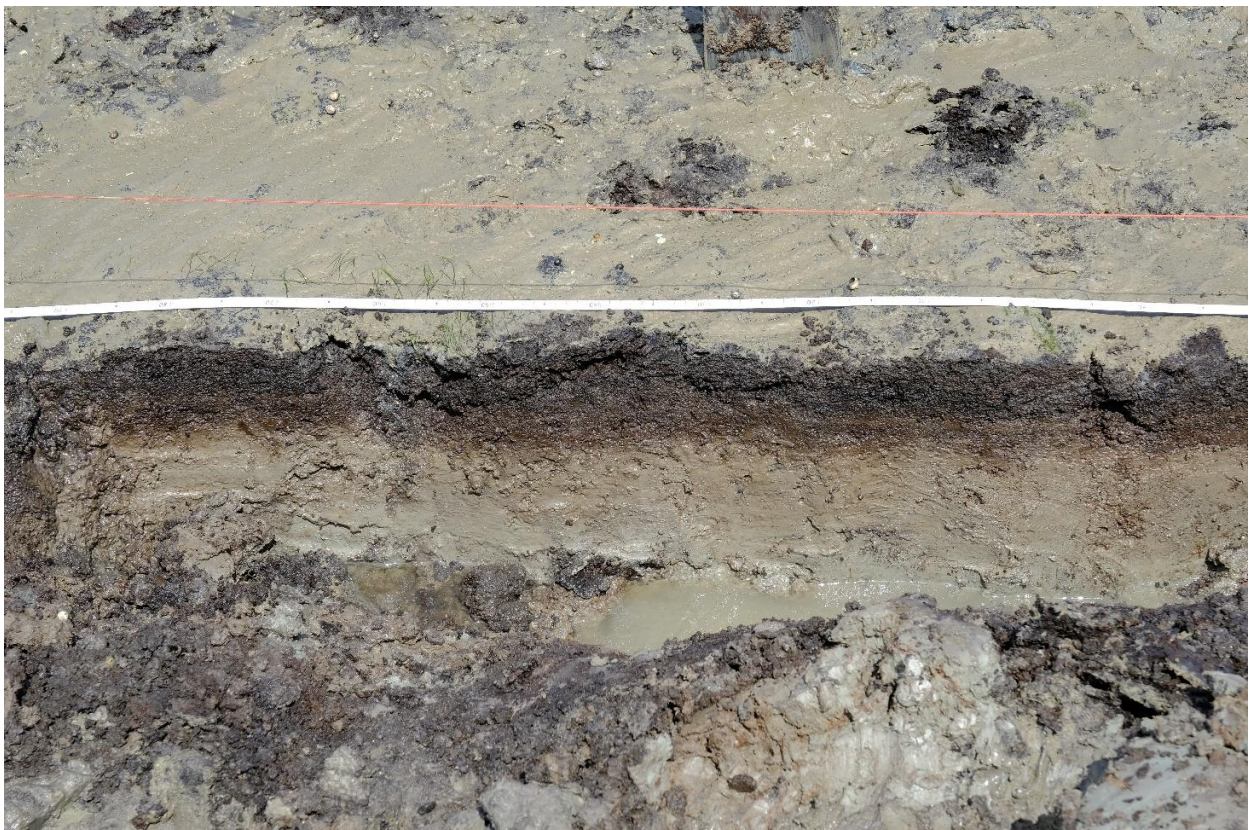


**Abbildung 6: Korngrößendreieck PWAP**



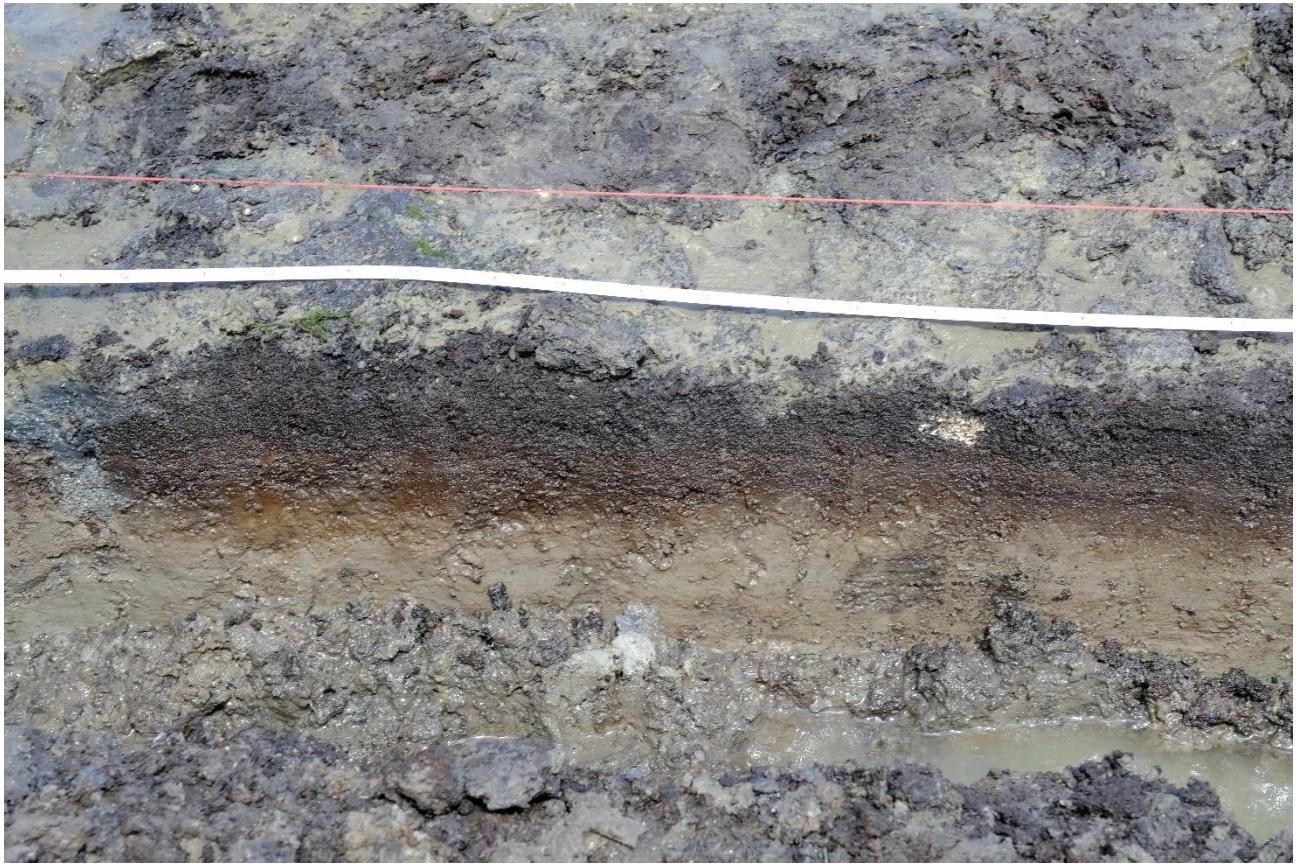


**Abbildung 7: Südlicher Abschnitt PWAP (Foto: H.-R. Bork)**



**Abbildung 8: Südlicher zentraler Abschnitt PWAP (Foto: H.-R. Bork)**





**Abbildung 9: Nördlicher zentraler Abschnitt PWAP (Foto: H.-R. Bork)**



**Abbildung 10: Nördlicher Abschnitt PWAP (Foto: H.-R. Bork)**



### 4.3 Stratigraphie PWP (Pellworm, Warft)

Dieses ca. 1,4 m tiefe und 3,3 m breite Profil wurde am 21. und 22. Juni 2016 ebenfalls im westlichen Untersuchungsgebiet von Waldhusen geöffnet. In der Umgebung dieses Standorts ist eine rechteckige Struktur zu erkennen, bei der es sich um eine ehemalige Warft handeln dürfte (siehe Abb. 4). Da das Profil aufgrund seiner Tiefe schwer zu bearbeiten war, wurde es über beide Tage immer wieder vertieft und verlängert. Dafür musste das Meerwasser, das während der Flut in die Grube gelaufen war, mit Eimern abgeschöpft und über eine Menschenkette in ausreichender Entfernung in einen flachen Priel geschüttet werden.

Die Basis des Profils PWP bildet ein mächtiges Kleipaket. Es besteht aus sandigem Schluff mit 7,6 % Ton, 73,9 % Schluff und 18,5 % Sand. Der Karbonatgehalt liegt bei 2,9 %, der Anteil an organischer Substanz (Glühverlust 550 °C) bei 5,2 % und der alkalische pH-Wert bei 7,8.

An der Wattoberfläche steht eine bis zu 35 cm mächtige heterogene Torfmudde mit Torf- und Holzstücken an, die durch die Erosion von früher dort vorhandenen Mooren entstanden sein könnte. Wahrscheinlicher ist, dass die Torfmudde von Menschenhand umgelagert wurde. Die mineralischen Bestandteile der Torfmudde bestehen aus mittel tonigem Schluff mit folgender Zusammensetzung: 12,5 % Ton, 67,7 % Schluff und 19,8 % Sand. Der pH-Wert ist mit 5,2 sauer. Für eine Torfmudde liegt der Karbonatgehalt von 4,6 % und der Anteil an organischer Substanz (Glühverlust 550 °C) von 40,3 % im Normalbereich. Sie enthält zum Teil noch gut zu erkennende Pflanzenbestandteile.

#### **Stratigraphie des Profils PWP**

Phase 1: Ablagerung von Klei (sandiger Schluff)

Phase 2: Torfmuddenbildung (mittel toniger Schluff)

Phase 3: Grabenanlage

Phase 4: Verfüllung des Grabens mit  $Y_0$  mit Rinderwirbeln und Keramikbruchstücken (sandiger Schluff)

Phase 5: erneute Öffnung des Grabens

Phase 6: Verfüllung des 2. Grabens mit  $Y_1$  (grauer Schlick, schwach toniger Schluff)

Phase 7: Verfüllung des 2. Grabens mit  $Y_2$  (darin Holzstückchen, schwach toniger Schluff)

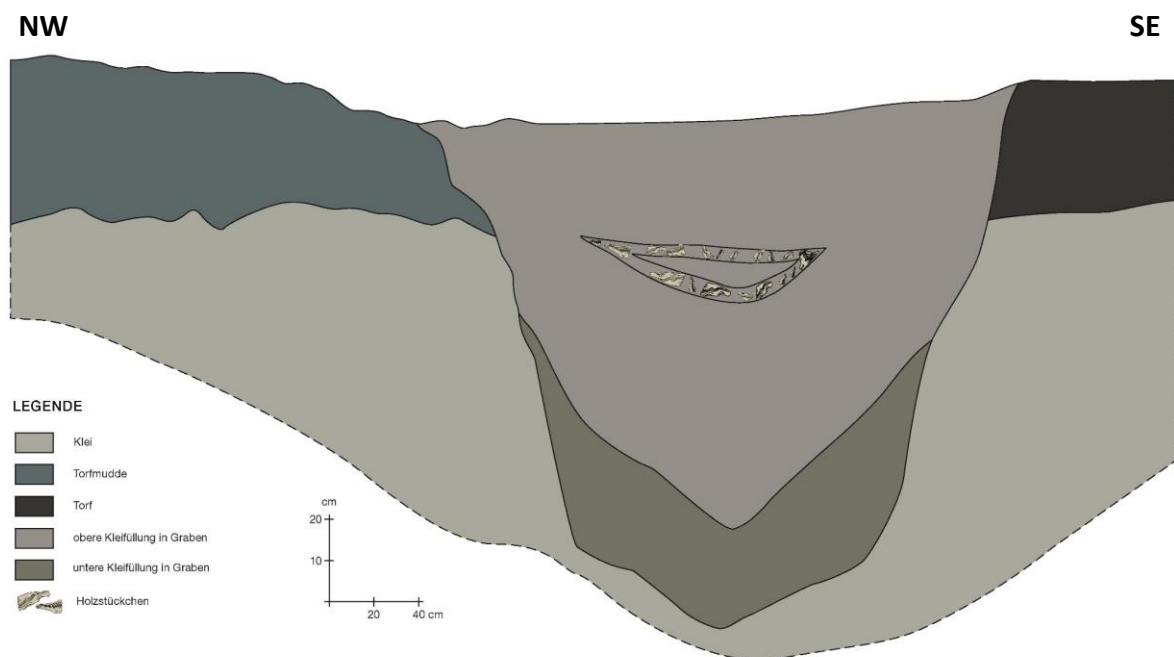
Phase 8: Verfüllung des 2. Grabens mit  $Y_3$  (grauer Schlick, sandiger Schluff)

Phase 9: Verfüllung des 2. Grabens mit  $Y_4$  (darin Holzstückchen, sandiger Schluff)

Phase 10: Verfüllung des 2. Grabens mit  $Y_5$  (grauer Schlick, schwach toniger Schluff)

Um die Warft trocken zu halten und um sie besser nutzen zu können, wurde ein 126 cm tiefer Entwässerungsgraben angelegt. Dieser wurde wiederholt genutzt, wieder aufgegeben und mit Schlick verfüllt. In der untersten Füllschicht  $Y_0$  befanden sich Rinderknochen und zerstörte Keramikgefäße. Offenbar wurde der Graben zeitweise als Müllgrube genutzt. In dieser Schicht dominiert sandigen Schluff, der aus 7,1 % Ton, 72,5 % Schluff und 20,4 % Sand besteht. Der pH-Wert liegt bei 6,8. Die über  $Y_0$  liegenden Füllschichten  $Y_1$  und  $Y_5$  haben pH-Werte von 7,5, die Schichten  $Y_2$ ,  $Y_3$  und  $Y_4$  7,2 und 7,3.

Der Karbonatgehalt von 2 bis 2,5 % variiert bei allen 6 Füllschichten kaum. Der Gehalt an organischer Substanz (Glühverlust 550 °C) variiert zwischen  $Y_0$  mit 18,3 % und  $Y_5$  mit 8,2 %. Für  $Y_1$  bis  $Y_4$  liegen die Werte mit 10,2 % bis 16,6 % im mittleren Bereich. Die Feinbodenart variiert bei den Füllschichten zwischen schwach tonigem und sandigem Schluff.



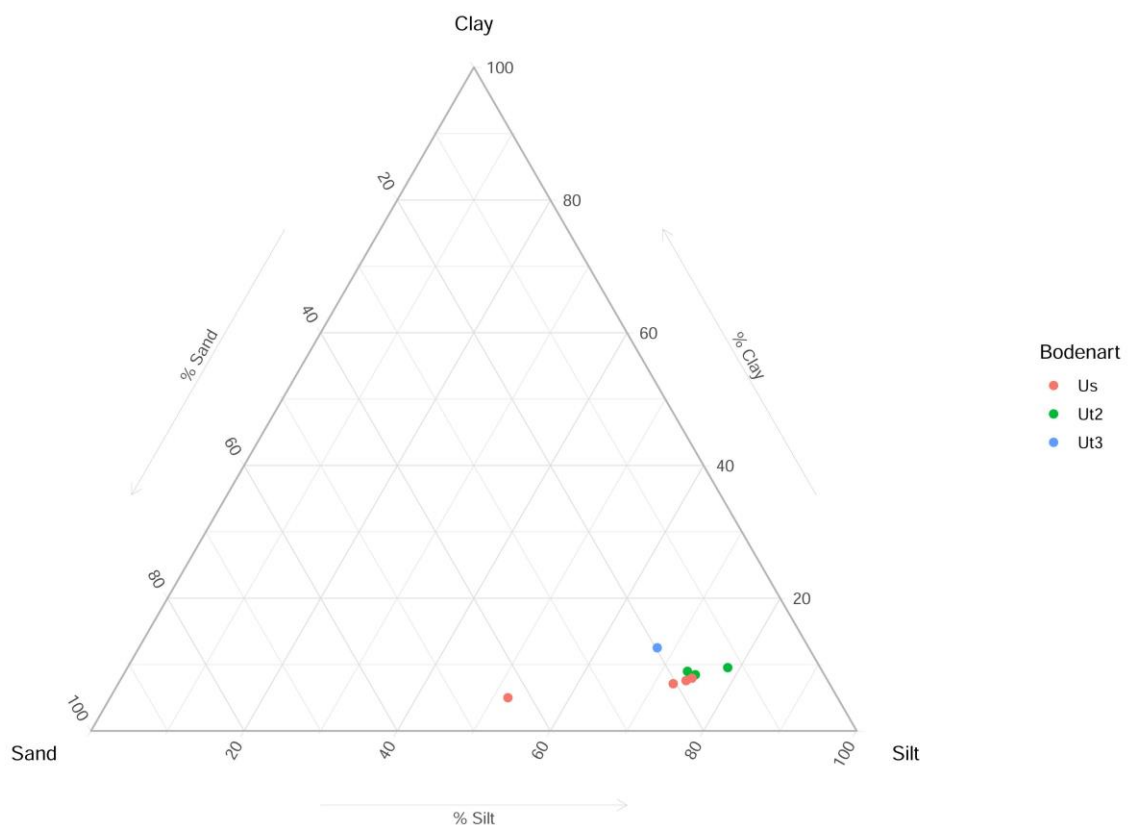
**Abbildung 11: Profilzeichnung PWP, (Graphik: D. Kramer)**

Probe	pH	N% gesamt	C% gesamt	Karbonate %	organ. Subst. %
Klei (45-60cm)	7,8	0,1	2,0	2,9	5,2
Torfmudde	5,2	1,2	21,4	4,6	40,3
Y0	6,8	0,5	9,9	2,5	18,3
Y1	7,5	0,3	4,8	2,5	10,2
Y2	7,2	0,4	8,0	2,4	16,6
Y3	7,3	0,4	6,9	2,1	14,0
Y4	7,2	0,4	7,9	2,0	16,1
Y5	7,5	0,0	3,8	2,5	8,2

**Tabelle 3: Laboranalysen PWP**

Probe	Ton %	Schluff %	Sand %	Symbol	Bezeichnung
Klei (45-60cm)	7,57	73,92	18,50	Us	sandiger Schluff
Torfmudde	12,52	67,68	19,79	Ut3	mittel toniger Schluff
Y0	7,11	72,48	20,41	Us	sandiger Schluff
Y1	8,98	73,41	17,62	Ut2	schwach toniger Schluff
Y2	8,46	74,69	16,85	Ut2	schwach toniger Schluff
Y3	7,95	74,51	17,54	Us	sandiger Schluff
Y4	5,00	51,95	43,05	Us	sandiger Schluff
Y5	9,53	78,39	12,08	Ut2	schwach toniger Schluff

**Tabelle 4: Bodenarten PWP**



**Abbildung 12: Korngrößendreieck PWP**





**Abbildung 13: Verfülltes Grabensystem an der Warft Waldhusen (Foto: H.-R. Bork)**



**Abbildung 14: Arbeitsbedingungen an der Warft Waldhusen (Foto: H.-R. Bork)**



#### 4.4 Stratigraphie PB1P (Pellworm, Brunnenprofil 1)

Der Standort PB1P liegt ca. 300 m von der Deichlinie vor der Nordküste von Pellworm im östlichen Untersuchungsgebiet Waldhusen. Am 21. April 2016 wurde das Profil bei Niedrigwasser auf einer Länge von 3,40 m 0,55 m tief ausgehoben, aufgenommen und beprobt.

Durch den Einfluss der Gezeiten wurde hier in einer Transgressionsphase ein Kleipaket von mindestens 40 cm Mächtigkeit abgelagert. Die Textur des Kleis besteht aus 7,8 % Ton, 73,5 % Schluff und 18,7 % Sand. Der Anteil an organischer Substanz (Glühverlust 550 °C) ist heute mit 5 % relativ gering, der pH-Wert liegt bei ca. 8.

Während der anschließenden Regressionsphase legten Menschen einen Brunnen an, der später mit Torf verfüllt wurde. Die bis zu 260 cm breite Torffüllung ist ca. 28 bis 44 cm mächtig. Dieser Torf hat mit 70,1 % einen sehr hohen Anteil an organischer Substanz (Glühverlust 550 °C) und ist mit einem pH-Wert von 5,4 saurer. Die annähernd runde Form und die Tiefe lassen auf einen Brunnen schließen.

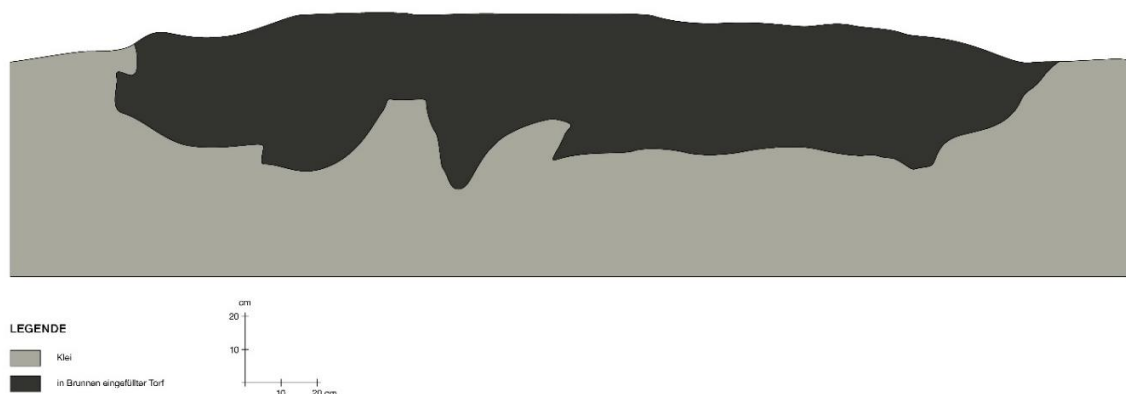
In jüngster Zeit wurde der obere Teil des Kleis in der Umgebung des Brunnens abgetragen, so dass der Torf heute bis zu 13 cm aus der Klei-Umgebung aufragt.

##### **Stratigraphie des Profils PB1P**

Phase 1: Ablagerung von Klei (sandiger Schluff)

Phase 2: Anlage des Brunnens

Phase 3: Verfüllung des Brunnens mit Torfstückchen (schwach schluffiger Sand)



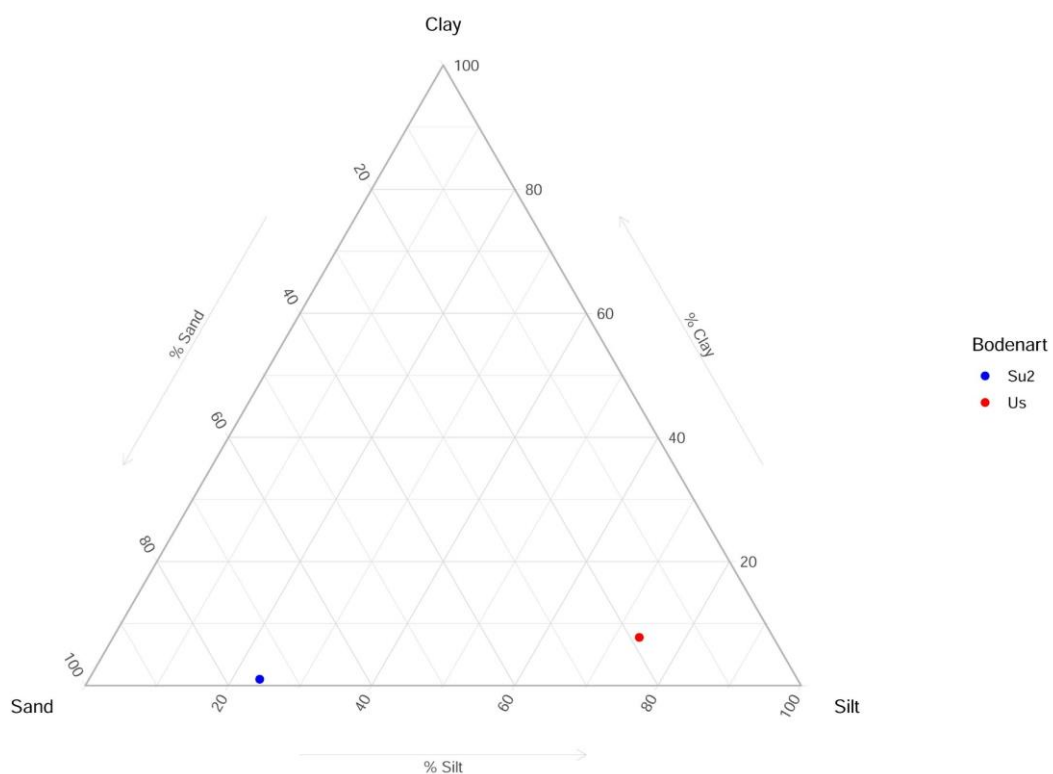
**Abbildung 15: Profilzeichnung PB1P, (Graphik: D. Kramer)**

Probe	pH	N% gesamt	C% gesamt	Karbonate %	organ. Subst. %
Torffüllung	5,4	1,1	36,3		70,1
Klei	8,1	0,1	1,8		5,0

**Tabelle 5: Laboranalysen PB1P**

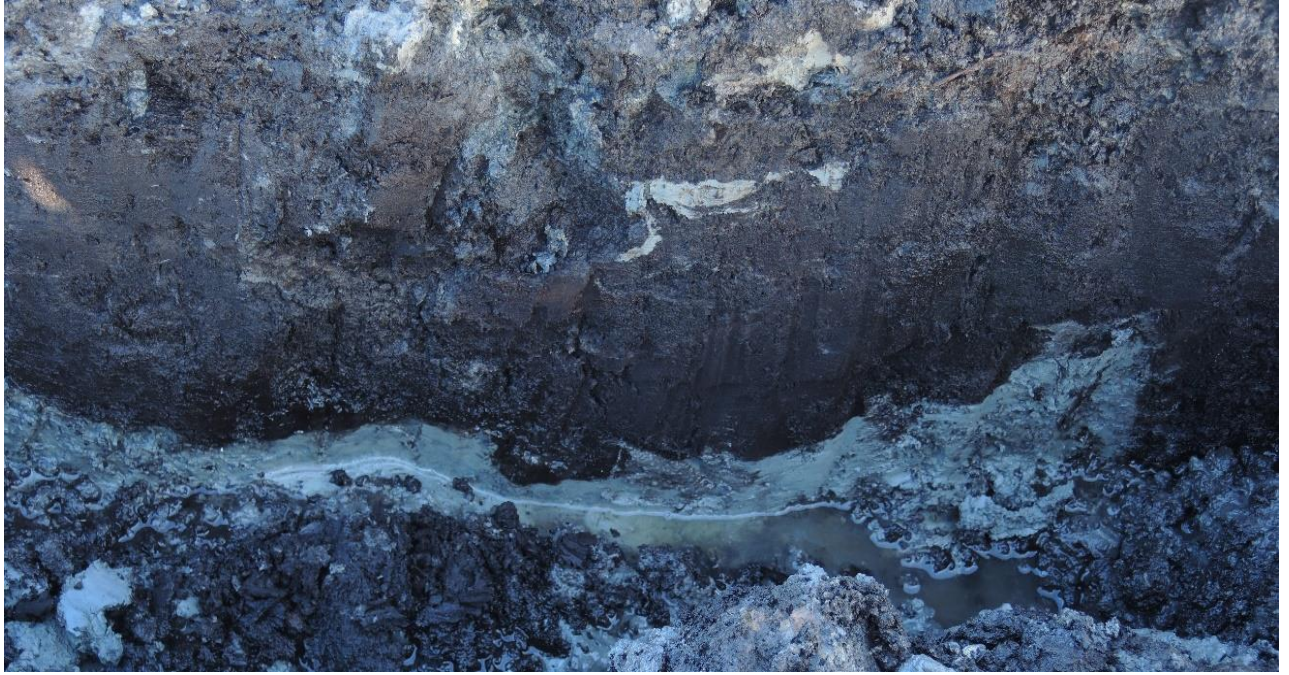
Probe	Ton %	Schluff %	Sand %	Symbol	Bezeichnung
Torffüllung	1,01	23,85	75,13	Su2	schwach schluffiger Sand
Klei	7,76	73,51	18,72	Us	sandiger Schluff

**Tabelle 6: Bodenarten PB1P**



**Abbildung 16: Korngrößendreieck PB1P**





**Abbildung 17: Brunnenprofil 1, PB1P (Foto: S. Dazert)**



**Abbildung 18: Brunnenprofil 1, PB1P (Foto: S. Dazert)**



#### 4.5 Stratigraphie PB2P (Pellworm, Brunnenprofil 2)

Dieses Profil liegt ca. 5 m vom Rechteckprofil PRP im östlichen Untersuchungsgebiet von Waldhusen entfernt und wurde am 23.06.2016 aufgegraben. Es ist 2,8 m lang und knapp 60 cm tief.

Es enthält einen Brunnen, der von einem nach Keramikdatierungen vor 1362 zur Entwässerung angelegten Grabensystem geschnitten und bei der Ersten Groten Mandränke im Januar 1362 zerstört wurde. Es lassen sich noch heute Strukturen im Watt erkennen, die auf eine flache Warft hindeuten, zu der dieser Brunnen gehört haben dürfte. Auch das Rechteckprofil liegt im Bereich der Warft, es könnte sich hierbei um einen weiteren, von den Warftbewohnern genutzten Brunnen gehandelt haben.

Das aus sandigem Schluff (6 % Ton, 68 % Schluff, 26 % Sand) bestehende Kleipaket bildet auch hier die Basis und die seitliche Umgebung von Brunnen- und Grabenfüllung. Der pH-Wert des Kleis beträgt 8,1, der Karbonatgehalt liegt bei 25 % und der Gehalt an organischer Substanz (Glühverlust 550 °C) bei geringen 3,9 %. Bevor diese sehr flache und damit wohl unsichere Warft aufgegeben wurde, wurde der Brunnen vorwiegend mit Torfmaterial verfüllt, in dem kleine Bändchen aus sandigem Schluff und schwach tonigem Schluff liegen. Zwei der mineralischen Bändchen im Torf wurden beprobt. Sie hatten folgende Korngrößen-zusammensetzung: Probe 1: 1,2 % Ton, 56,8 % Schluff und 42 % Sand (sandiger Schluff) sowie Probe 2: 8,4 % Ton, 75 % Schluff und 6,3 % Sand (schwach toniger Schluff).

Die Gehalte von Karbonaten und organischer Substanz unterscheiden sich bei den beiden mineralischen Proben aus der torfreichen Brunnenfüllung erheblich: Der Karbonatanteil von Probe 1 (sandiger Schluff) liegt bei 15,4 %, und die organische Substanz bei 74,9 %, bei Probe 2 (schwach toniger Schluff) bei 2,1 % (Karbonate) bzw. 23 % (org. Substanz). Der heutige pH-Wert hingegen variiert kaum, er liegt zwischen 6 und 6,3.

Nach Aufgabe der Warft wurde der untersuchte Bereich in Ackerland umgewandelt. Helmut Bahnsen (frdl. mündl. Mitteilung) beobachtete noch vor einigen Jahren Pflugspuren an der Geländeoberfläche in der Umgebung des Profils PB2P.

Um das Ackerland auf diesen sehr feuchten Standorten zu entwässern, wurden die heute noch gut zu erkennenden, parallel verlaufenden Gräben in einem Horizontalabstand von ca. 9 bis 13 m angelegt. Die Grabenbreite beträgt ca. 1,4 bis 1,9 m. Die Gräben sind mindestens 45 cm tief und weisen eine U-förmiges Querprofil auf. Der im Profil PB2P sichtbare Graben wurde mit schwach torfigem Material verfüllt, das hohe Anteile mineralischer Substanz und zahlreiche mineralische Bändchen enthält. Die Textur der mineralischen Füllung des Grabensystems (schwach toniger Schluff) setzt sich wie folgt zusammen: Tongehalt 9,4 %, Schluffgehalt 73,1 % und einem Sandgehalt von 17,5 %. Der pH-Wert liegt bei 6,8, der Anteil an organischer Substanz bei ca. 26 % und der Karbonatgehalt bei 6 %.

Nach der Verfüllung des Grabens wurde in dieser Füllung ein zweiter, im Querschnitt V-förmiger Graben geöffnet, der im Profil gut zu erkennen ist. Auch dieser Graben wurde nach Aufgabe der Nutzung wieder verfüllt, zuerst mit hellgrauem, dann darüber mit humoserem dunkelgrauen Schlick. Der hellgraue, ebenfalls schwach tonige Schluff an der Basis der zweiten Grabenfüllung besteht aus 9,6 % Ton, 78,4 % Schluff und 12 % Sand. Der pH-Wert liegt bei 7,3 und unterscheidet sich damit nur gering von der ersten Grabenfüllung. Der Karbonatgehalt ist mit 2 % erheblich niedriger, ebenso wie der Anteil an organischer Substanz, der bei 11,5 % liegt. Der humose Schlick im oberen Teil der zweiten Grabenfüllung besteht aus 11,0 % Ton, 80,2 % Schluff und 8,8 % Sand. Der pH-Wert von 6,6, der Karbonatgehalt von 1,1 % und der Anteil an organischer Substanz von 15,2 % unterscheiden sich kaum von der helleren Füllung an der Basis des zweiten Grabens.

Das Ackerland mit seinen Entwässerungsgräben wurde durch die Erste Grote Mandränke im Januar 1362 zerstört.

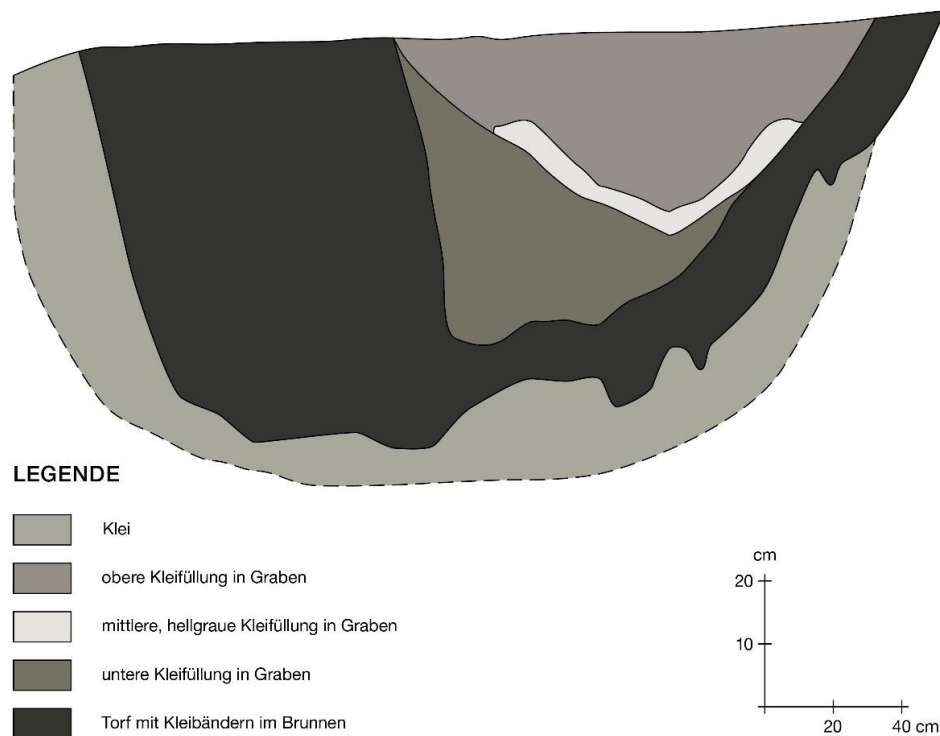
Außerhalb des Profils PB2P ist deutlich ein drittes, jüngeres Grabensystem zu erkennen. Es durchschneidet die Gräben, die vor 1362 angelegt worden waren. Dieses Entwässerungssystem ist durch die Zweite Grote Mandränke 1634 zerstört worden.

### **Stratigraphie des Profils PB2P**

- Phase 1: Ablagerung von Klei (sandiger Schluff)
- Phase 2: Anlage eines 2,8 m breiten und mindestens 60 cm tiefen Brunnens
- Phase 3: Verfüllung des Brunnens mit Torfmaterial, das sandig schluffige und schwach tonig schluffige Bänder enthält (Probennahme an zwei Stellen in der Brunnenfüllung)
- Phase 4: Aufgabe der flachen Warft, zu der der Brunnen gehörte
- Phase 5: Anlage von Ackerland (Pflugspuren waren noch vor einigen Jahren sichtbar) mit einem System von Entwässerungsgräben im Horizontalabstand von ca. 9 bis 13 m, im Profil PB2P Grabenbreite 140 cm und Grabentiefe mindestens 45 cm
- Phase 6: Verfüllung des Grabensystems mit Schlick und Torf (schwach toniger Schluff, U-förmige Struktur)
- Phase 7: Anlage eines 2. Grabens mit flach V-förmigem Querprofil in der Füllung des ersten Grabens
- Phase 8: Verfüllung des 2. Grabens zunächst mit hellgrauem Klei (schwach toniger Schluff), dann mit humosem Schlick (schwach toniger Schluff)
- Phase 9: Zerstörung der Ackerflur durch die Erste Grote Mandränke im Januar 1362

### **In der Umgebung des Profils:**

- Phase 10: Anlage eines 3. Grabensystems
- Phase 11: Zerstörung des 3. Grabensystems am 11./12. Oktober 1634 durch die Zweite Grote Mandränke



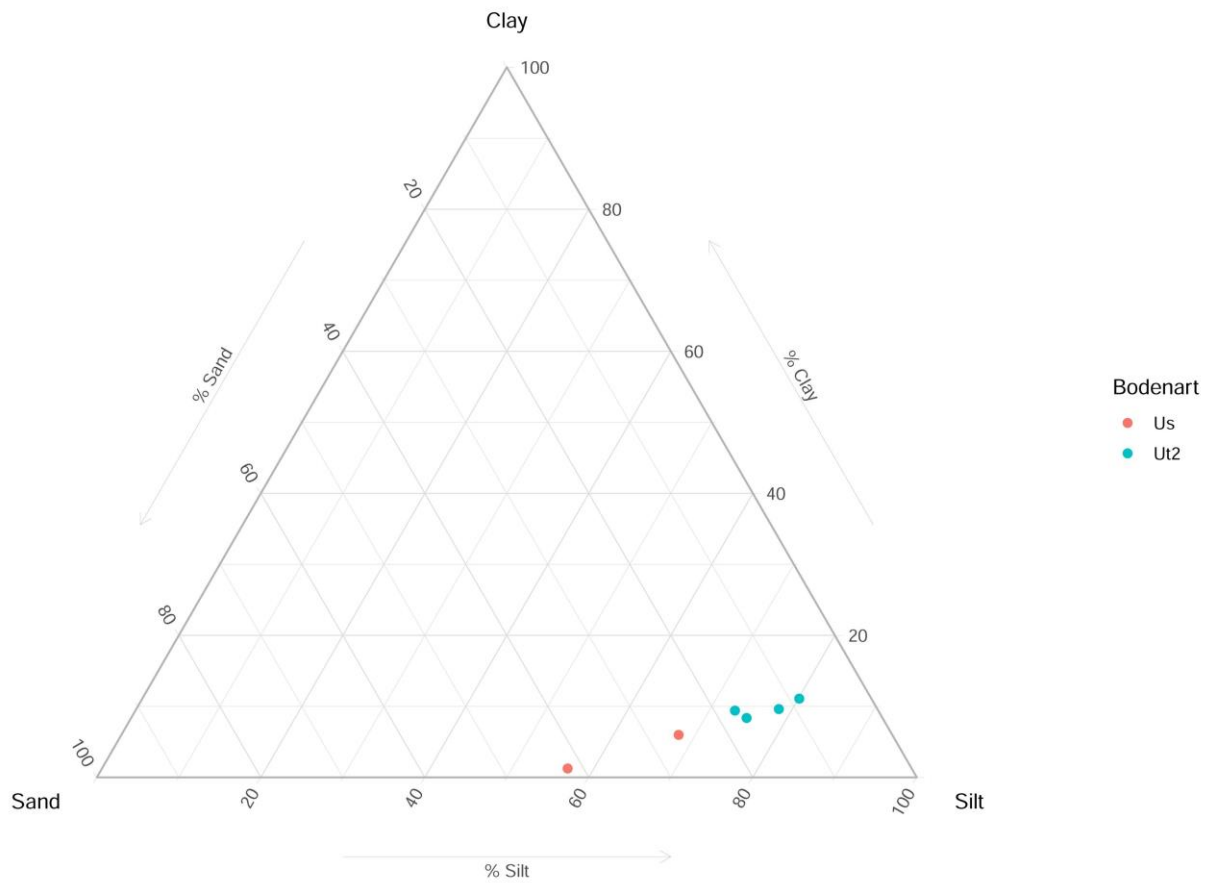
**Abbildung 19: Profilzeichnung PB2P** (Graphik: D. Kramer)

Probe	pH	N% gesamt	C% gesamt	Karbonate %	organ. Subst. %
heller Klei	8,1	0,1	1,5	25,0	3,9
Brunnenfüllung 1	6,0	1,5	38,1	12,4	749
Brunnenfüllung 2	6,3	0,6	12,2	2,1	23,0
1. Grabenfüllung vor 1362	6,8	0,7	13,7	6,0	26,6
2. Grabenfüllung vor 1362, hellgrauer Klei	7,3	0,3	5,3	2,0	11,5
2. Grabenfüllung vor 1362, dunkelgrauer Klei	6,6	0,4	7,0	1,1	15,2

**Tabelle 7: Laboranalysen PB2P**

Probe	Ton %	Schluff %	Sand %	Symbol	Bezeichnung
heller Klei	5,98	67,96	26,05	Us	sandiger Schluff
Brunnenfüllung 1	1,25	56,79	41,96	Us	sandiger Schluff
Brunnenfüllung 2	8,36	75,06	16,58	Ut2	schwach toniger Schluff
1. Grabenfüllung vor 1362	9,40	73,13	17,47	Ut2	schwach toniger Schluff
2. Grabenfüllung vor 1362, hellgrauer Klei	9,62	78,36	12,02	Ut2	schwach toniger Schluff
2. Grabenfüllung vor 1362, dunkelgrauer Klei	11,08	80,12	8,80	Ut2	schwach toniger Schluff

**Tabelle 8: Bodenarten PB2P**



**Abbildung 20: Korngrößendreieck PB2P**



**Abbildung 21: Brunnenprofil 2, PB2P (Foto: S. Dazert)**



#### 4.6 Stratigraphie PB3P (Pellworm, Brunnenprofil 3)

Dieses Brunnenprofil liegt ca. 25 m vom Rechteckprofil im östlichen Untersuchungsgebiet von Waldhusen entfernt und wurde am 24.06.2016 ausgegraben. Es ist ca. 1,8 m lang und knapp einen Meter tief.

Die Gezeiten haben hier einen Klei mit einem Tongehalt von 8,2 %, einem Schluffgehalt von 77 % und einem Sandgehalt von 14,8 % abgelagert (schwach toniger Schluff). Der heutige, schwach alkalische pH-Wert liegt bei 7,9. Das Kleipaket weist außerdem ein Karbonatgehalt von 1,3 % und einen geringen Gehalt an organischer Substanz (Glühverlust 550 °C) von 4,4 % auf.

Wie bei den vorher beschriebenen Brunnenprofilen wurde auch hier während einer Regressionsphase ein Brunnen angelegt und nach der Aufgabe nach und nach mit torfigem Material befüllt. Durch die Flut lagerten sich immer wieder dünne Kleibänder auf den Torflagen ab, die in der Profilzeichnung als Schlickbänder zu erkennen sind. Die torfige Füllung besteht zu 57,7 % aus organischem Material, enthält 5,8 % Kalk und ist mit einem pH-Wert von 6,2 sehr schwach sauer. Die mineralische Komponente der torfreichen Schichten hat die folgende Korngrößenverteilung: 4,0 % Ton, 60,4 % Schluff und 35,6 % Sand (sandiger Schluff).

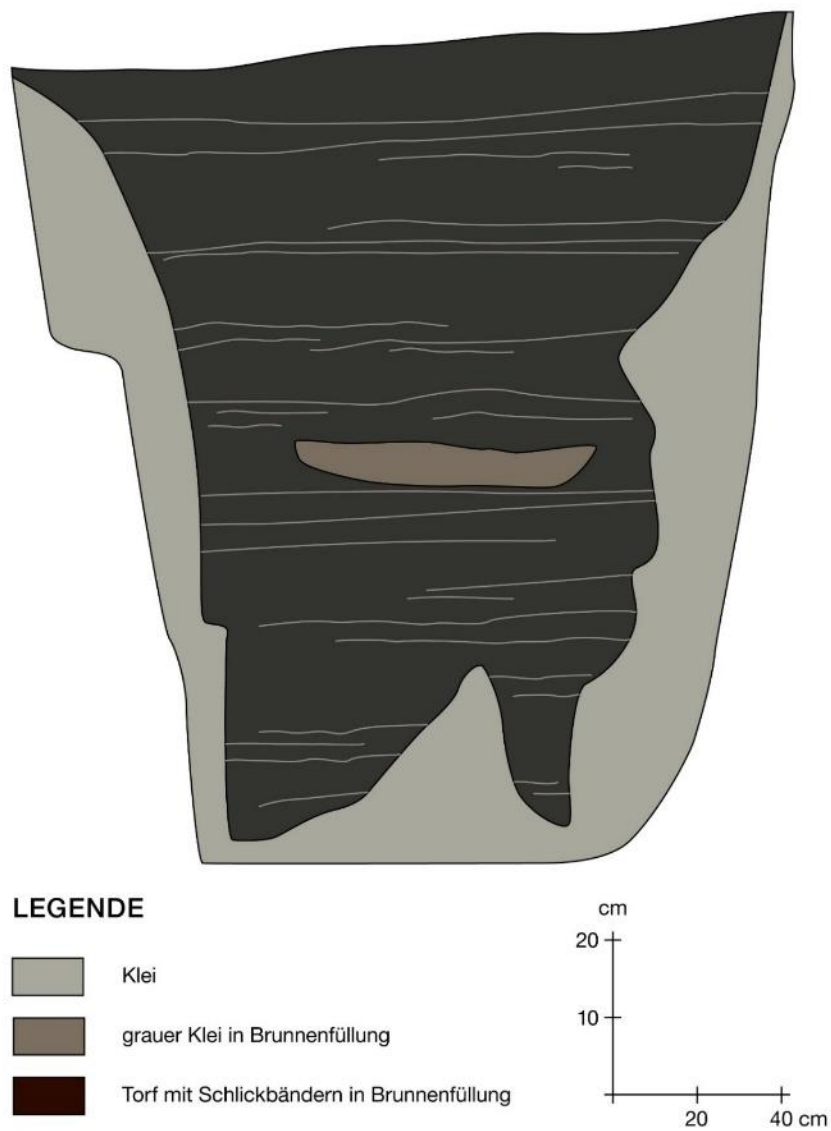
Zwischen den Torf- und Schlicklagen befindet sich ein 5 cm mächtiges graues Kleipaket, welches eine dunklere Farbe aufweist als der den Brunnen umgebende Klei und folgende Textur besitzt: 12,1 % Ton, 78,2 % Schluff und 9,7 % Sand (mittel toniger Schluff). Der Gehalt an organischer Substanz (Glühverlust 550 °C) liegt bei 17,9 %, der Kalkgehalt bei 2,5 %, der pH-Wert bei 6,5 %. Demnach ist das Kleipaket, wie die Torffüllung, ebenfalls schwach sauer.

##### **Stratigraphische Phasen des Profils PB3P**

Phase 1: Ablagerung von Klei (schwach toniger Schluff)

Phase 2: Ausheben des Brunnens (ohne seitliche Befestigung)

Phase 3: Allmähliche Verfüllung des Brunnens mit Torflagen, dazwischen Ablagerung von grauem Schlick (sandiger Schluff), graues Kleiband in Brunnenfüllung (mittel toniger Schluff)



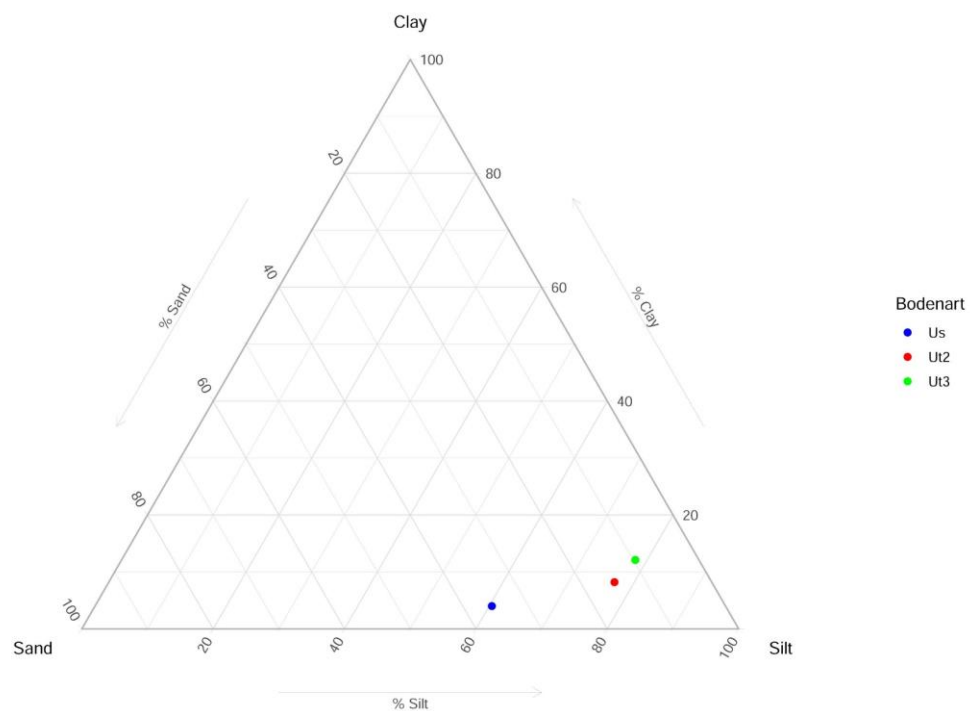
**Abbildung 22: Profilzeichnung PB3P** (Graphik: D. Kramer)

Probe	pH	N% gesamt	C% gesamt	Karbonate %	organ. Subst. %
Klei	7,9	0,1	1,1	1,3	4,4
Torf mit Schlickbändern	6,2	1,1	28,5	5,8	57,7
Grauer Klei in Brunnenfüllung	6,5	0,4	8,2	2,5	17,9

**Tabelle 9: Laboranalysen PB3P**

Probe	Ton %	Schluff %	Sand %	Symbol	Bezeichnung
Klei	8,21	76,98	14,81	Ut2	schwach toniger Schluff
Torf mit Schlickbändern	4,01	60,42	35,57	Us	Sandiger schluff
Grauer Klei in Brunnenfüllung	12,11	78,21	9,69	Ut3	mittel toniger Schluff

**Tabelle 10: Bodenarten PB3P**



**Abbildung 23: Korngrößendreieck PB3P**

#### 4.7 Stratigraphie PG2P (Pellworm, Grabenprofil 2)

Der Standort PG2P liegt ca. 250 m nördlich der Deichlinie vor der Nordküste von Pellworm im östlichen Untersuchungsgebiet Waldhusen. Das 1,87 m lange und bis zu 54 cm tiefe Profil wurde am 23.06.2016 aufgenommen. Das Profil schneidet in etwa im rechten Winkel einen hier bis zu 48 cm tiefen und an der heutigen Geländeoberfläche 133 cm breiten, bauchigen Entwässerungsgraben, der im Klei angelegt wurde.

Die Textur des mindestens 50 cm mächtigen Kleis besteht aus 6,7 % Ton, 61,8 % Schluff und 31,5 % Sand. Der Anteil an organischer Substanz (Glühverlust 550 °C) ist heute mit ca. 7 % relativ gering, der pH-Wert liegt bei schwach sauren 6,29.

Auf dem Klei bildete sich ein etwa 8 cm mächtiges Anmoor.

In diese Abfolge aus Anmoor über Klei tieften Menschen den Entwässerungsgraben ein. Funde aus der Füllung des Grabens, die Rita und Helmut Bahnsen in den vergangenen Jahrzehnten bargen und die sie bis heute im Rungholt-Museum auf Pellworm aufbewahren und ausstellen, lassen den Schluss zu, dass er bis unmittelbar vor der Burchardiflut – der Zweiten Groten Mandränke – im Oktober 1634 in Nutzung war.

Der Graben wurde durch natürliche Prozesse vollständig mit grauem, schwach humosem Schlick verfüllt. Dieser weist die folgende Textur auf: 9,9 % Ton, 66,8 % Schluff und 23,3 % Sand.

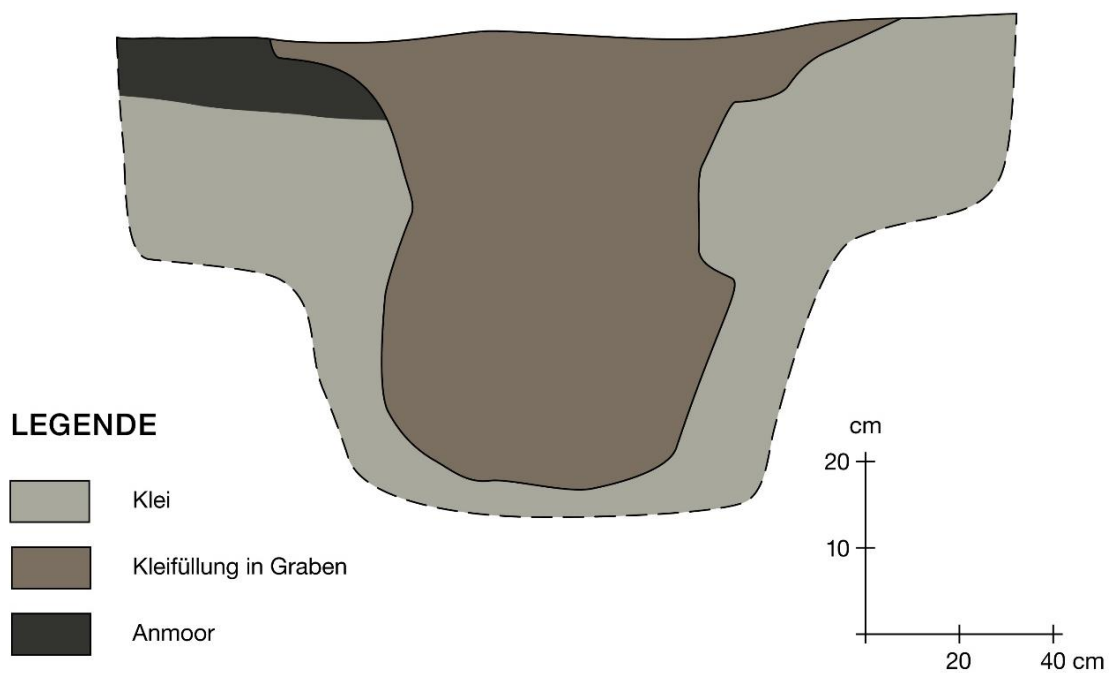
##### **Stratigraphische Phasen des Profils PG2P**

Phase 1: Ablagerung von Klei

Phase 2: beginnende Moorbildung (bis heute erhalten blieb ein Anmoor aus sandigem Schluff)

Phase 3: Anlage des Grabens vor der Zweiten Groten Mandränke im Oktober 1634

Phase 4: Verfüllung des Grabens mit grauem Schlick (schwach toniger Schluff)



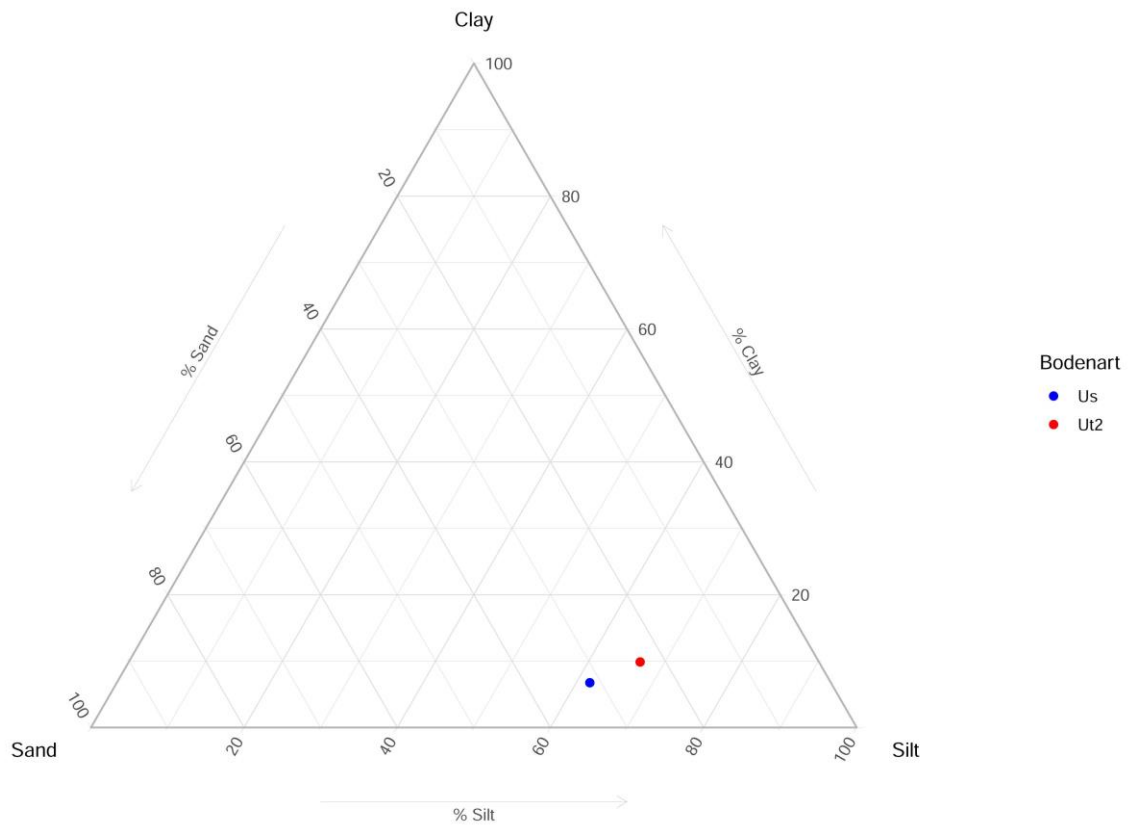
**Abbildung 24: Profilzeichnung PG2P** (Graphik: D. Kramer)

Probe	pH	N% gesamt	C% gesamt	Karbonate %	organ. Subst. %
Klei	6,3	0,2	3,1	1,6	7,1
Kleifüllung in Graben	6,3	0,2	2,9	2,1	6,6

**Tabelle 11: Laboranalysen PG2P**

Probe	Ton %	Schluff %	Sand %	Symbol	Bezeichnung
Klei	6,74	61,77	31,48	Us	sandiger Schluff
Kleifüllung in Graben	9,83	66,78	23,35	Ut2	schwach toniger Schluff

**Tabelle 12: Bodenarten PG2P**



**Abbildung 25: Korngrößendreieck PG2P**



**Abbildung 26: Grabenprofil 2 (Foto: H.-R. Bork)**

#### 4.8 Stratigraphie PRP (Pellworm, Rechteckprofil)

Dieses Profil wurde während der Feldkampagne 2016 am 24.06. im östlichen Untersuchungsgebiet Waldhusen etwa 260 m vom Pellwormer Deich in nördlicher Richtung entfernt im Watt ausgehoben. Es ist ca. 1,8 m lang, bis zu 85 cm tief.

Durch den Einfluss der Gezeiten wurde über einen sehr langen Zeitraum ein mächtiges Kleipaket mit folgender Textur abgelagert: 8,2 % Ton, 75 % Schluff und 16,8 % Sand. Es ist ein schwach toniger Schluff. Mit einem pH-Wert von 8,1 ist die Matrix des Sedimentes alkalisch, der Kalkanteil liegt bei 15,2 %.

Bei der von Menschen ausgehobenen Form dürfte es sich um einen Brunnen handeln, der später – nach der Aufgabe der Nutzung – mit flachen Torfbrocken und kurzen, wenige Zentimeter dicken Bändern aus mineralischem Material verfüllt wurde. Der Torf hat einen hohen Anteil an organischer Substanz (68,9 %, Glühverlust 550 °C). Die mineralischen Bänder haben einen Sandanteil von 52,1 %, einen Schluffanteil von 46,3 % und einen Tonanteil von nur 1,6 %; damit handelt es sich um stark schluffigen Sand, der nur in dieser Brunnenfüllung vorkommt. Der pH-Wert liegt heute bei 5,8, der Kalkanteil aufgrund von Schnecken- und Muschelresten in den mineralischen Bändern bei 13,3 %.

##### **Stratigraphische Phasen des Profils PRP**

Phase 1: Ablagerung von Klei (schwach toniger Schluff)

Phase 2: Ausheben der Grube

Phase 3: Verfüllung mit Torf und stark schluffigem Sand

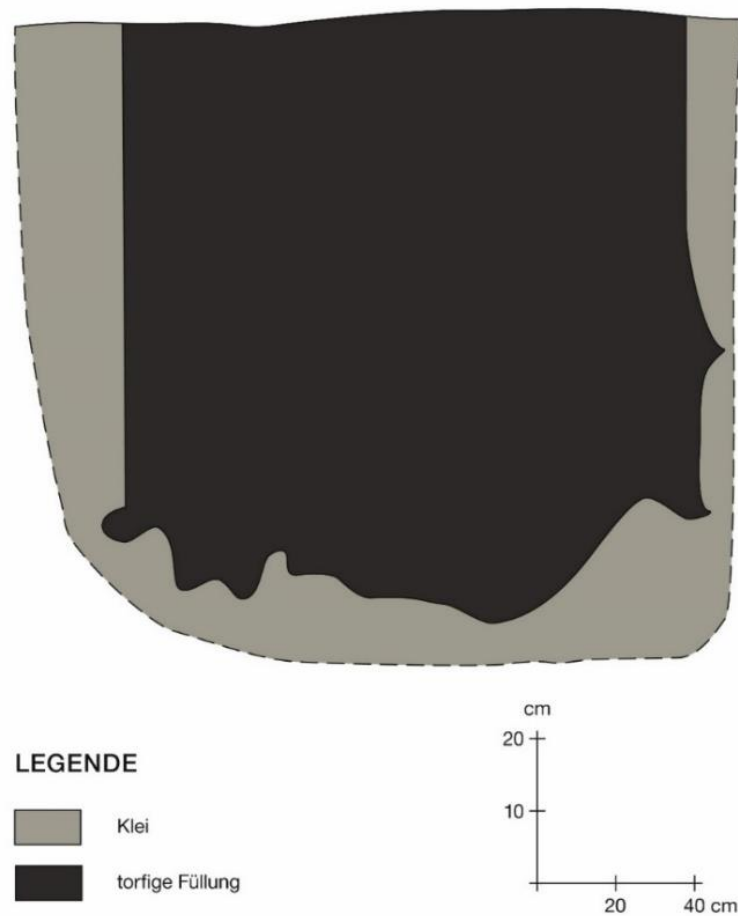


Abbildung 27: Profilzeichnung PRP (Graphik: D. Kramer)

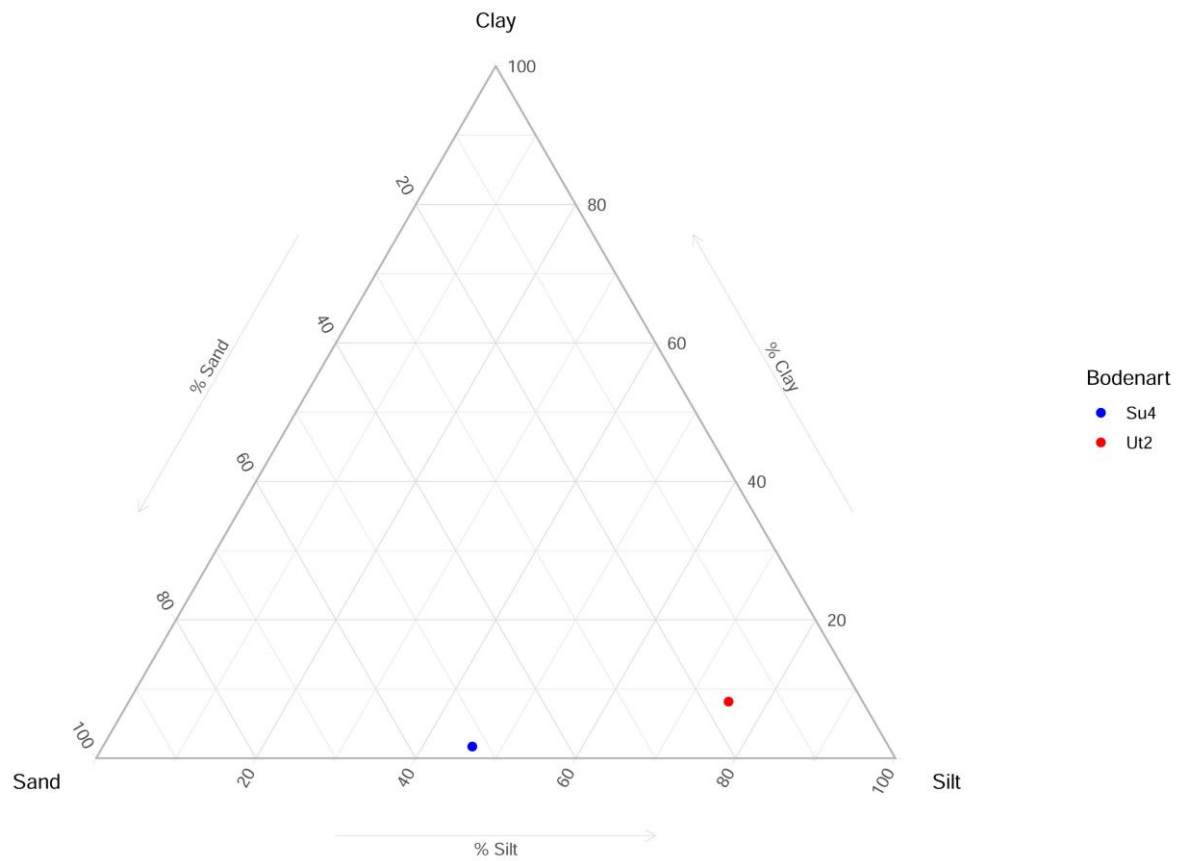
Probe	pH	N% gesamt	C% gesamt	Karbonate %	organ. Subst. %
Klei	8,1	0,07	2,0	15,2	4,6
Torfige Füllung	5,8	1,5	35,4	12,3	68,9

Tabelle 13: Laboranalysen PRP

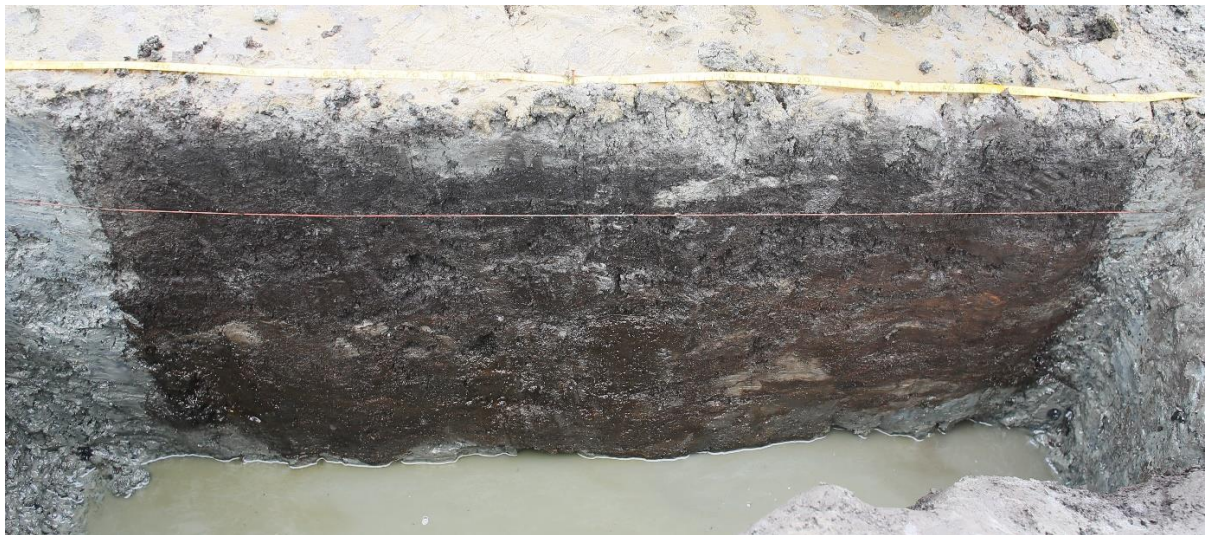
Probe	Ton %	Schluff %	Sand %	Symbol	Bezeichnung
Klei	8,18	75,03	16,78	Ut2	schwach toniger Schluff
Torfige Füllung	1,69	46,22	52,09	Su4	stark schluffiger Sand

Tabelle 14: Bodenarten PRP





**Abbildung 28: Korngrößendreieck PRP**



**Abbildung 29: Rechteckprofil (Foto: H.-R. Bork)**

#### 4.9 Stratigraphie PTP (Pellworm, Torfprofil)

Das Profil liegt im westlichen Untersuchungsgebiet Waldhusen. Es wurde am 21.06.2016 ausgehoben, aufgenommen und beprobt. Eine Probe wurde dem Klei und eine Mischprobe aus I Ah 1 und II Ah2 entnommen. Die Gesamtlänge des Profils betrug 3,7 m und die maximale Tiefe 0,45 m.

Der Klei an der Basis besitzt die folgende Textur: Torf 8,3 %, Schluff 78,4 %, Sand 13,3 %. Sein pH-Wert liegt heute bei 7,3, der Gehalt an organischer Substanz (Glühverlust 550 °C) bei geringen 4,85 %. Der Kalkgehalt ist mit 1,2 % ebenfalls gering.

Wie im Profil PWAP setzte nach der langanhaltenden Kleiablagerung eine Regressionsphase ein, in der sich wahrscheinlich unter Dauergrünland und unter feuchten Standortbedingungen ein Humushorizont I Ah1 mit einer Mächtigkeit von 8 bis 10 cm entwickelte.

Zwischen der Ablagerung von I Ah1 und des jüngeren Humushorizonts II Ah2 befindet sich ein ca. 1 cm dünnes Schlickband, das sich während einer Sturmflut abgelagert hat. Die Humushorizonte bestehen aus 8,7 % Ton, 66,6 % Schluff und 24,7 % Sand. Der pH-Wert liegt heute mit 5,3 im sauren Bereich, der Anteil an organischer Substanz (Glühverlust 550 °C) ist mit 53,8 % hoch. Der Kalkgehalt liegt bei 5,3 %.

Mit steigendem Meeresspiegel verschwindet die Vegetation, die zur Bildung oberen Humushorizontes geführt hatte.

Im oberen Ah-Horizont sind vertikal im Profil schmale, meist 3 bis 5 cm und maximal 7,5 cm tiefe kerbenförmige Eintiefungen sichtbar, die sich horizontal an der Geländeoberfläche fortsetzen. Die Abstände sind unregelmäßiger als im Profil PWAP. Dennoch dürfte es sich auch hier um Fahrspuren von ein- oder zweirädrigen Wagen handeln. In den Fahrspuren lagert sich bis heute durch die Gezeitenwirkung Schlick ab.

### Stratigraphische Phasen des Profils PTP

Phase 1: Ablagerung von Klei (schwach toniger Schluff)

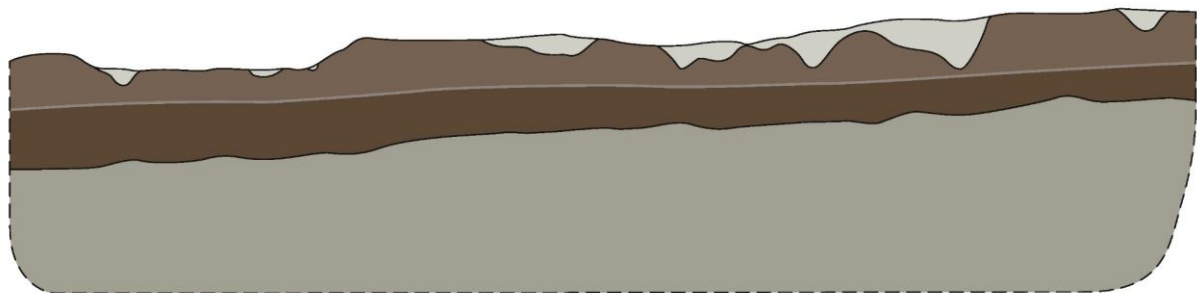
Phase 2: Bildung des Humushorizontes I Ah1 (schwach toniger Schluff))

Phase 3: Ablagerung eines 1-2 mm dünnen Schlickbandes auf I Ah 1 durch eine Sturmflut

Phase 4: Bildung eines weiteren Humushorizontes II Ah2

Phase 5: Befahren mit Karren, deren Räder meist 3-5, maximal 7,5cm in den II Ah2 einsinken

Phase 6: Ablagerung von Klei (II) durch die Gezeiten in den Fahrspuren



#### LEGENDE

- Klei
- mit Klei verfüllte Fahrspuren
- Ah 1
- Ah 2
- Schlickband

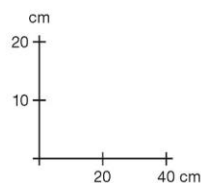


Abbildung 30: Profilzeichnung PTP (Graphik: D. Kramer)

Probe	pH	N% gesamt	C% gesamt	Karbonate %	organ. Subst. %
Klei	7,3	0,1	1,5	1,2	4,9
Ah	5,3	1,4	26,5	5,3	53,8

Tabelle 15: Laboranalysen PTP

Probe	Ton %	Schluff %	Sand %	Symbol	Bezeichnung
Klei	8,33	78,38	13,29	Ut2	schwach toniger Schluff
Ah	8,69	66,59	24,72	Ut2	schwach toniger Schluff

Tabelle 16: Bodenarten PTP

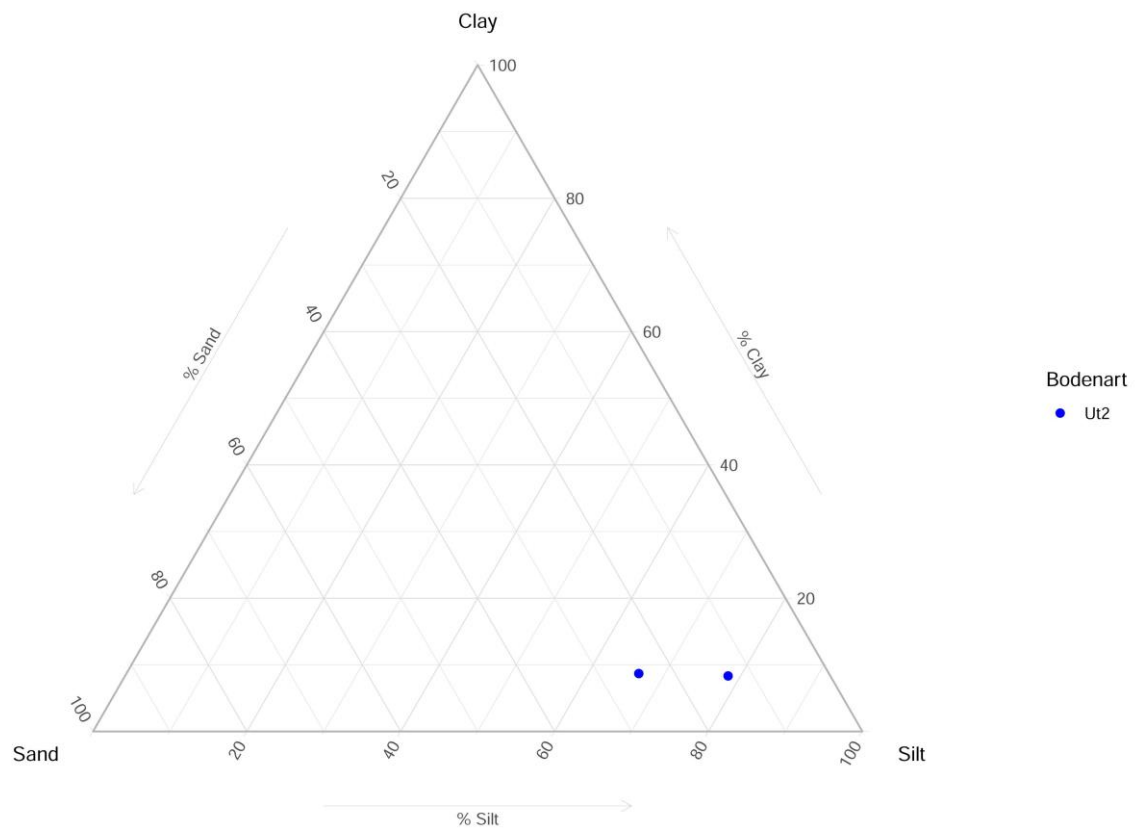


Abbildung 31: Korngrößendreieck PTP



Abbildung 32: Torfprofil (Foto: H.-R. Bork)





**Abbildung 33: Ausschnitt aus Profil PTP mit Wagenspuren (Foto: H.-R. Bork)**

## 5 Forschungsarbeiten auf Amrum

Auf Amrum befinden sich zahlreiche ur- und frühgeschichtliche Kulturlandschaftsrelikte. Ein morphologisch markantes lineares Objekt prägt den Osten von Amrum: der Krümwaal. Unklar ist sein Alter (vermutet wird eine Anlage in der Wikingerzeit), sein Aufbau und seine Veränderung seit der Anlage. In den Abschnitten 5.2 und 5.3 wird erstmals versucht, diese Punkte zu klären.

Ein weiteres bedeutendes geoarchäologisches Forschungsobjekt sind die Dünen von Meeram im Nordwesten der Insel. Hier wird die Bildung eines Feuchtgebietes vor der Übersandung vermutet. In den Abschnitten 5.4 bis 5.7 wird geprüft, ob es existierte und welche Relikte sich bis heute erhalten haben.

### 5.1 Lage der Profile Krümwaal 00 und 01

Abbildung 34 veranschaulicht die Lage der beiden im Krümwaal untersuchten Profile. Im Bereich der Schule von Nebel, der Öömrang-Skuul, liegt das Profil KRW\_00, am östlichen Rand des heute noch morphologisch ausgeprägten Abschnittes des Krümwaals liegt Profil KRW\_01.



**Abbildung 34: Lage der beiden Krümwaal-Profile**

## 5.2 Der Standort KRW 00

### 5.2.1 Stratigraphie von KRW 00

Das auf dem Schulgelände liegende Profil KRW 00 besitzt einen komplexen, vielphasigen Aufbau, wie die nachstehende Stratigraphie belegt.

Phase 1: Schmelzwässer lagern in der Saale-Kaltzeit Sande und Kiese ab.

Phase 2: Die in Phase 1 sedimentierten glazifluvialen Sande und Kiese werden in der Weichselkaltzeit kryoturbat durchmischt. Das Resultat sind Geschiebedecksande mit Kieslagen (Schichtbezeichnung: I).

Phase 3: Während des Mittelholozäns bildet sich in den Geschiebedecksanden mit Kieslagen eine mehr als 25 cm mächtige Braunerde mit den Horizonten I Bv (Nr. ① in der Zeichnung) und I Ah (②) sehr wahrscheinlich unter Wald. Unter dem Krümwaal ist dieser Boden bis heute vollständig konserviert und kaum verändert erhalten geblieben – eine seltene Situation.

Phase 4: Der Wald wird gerodet.

Phase 5: Stürme lagern lokal das aus hellen Sanden bestehende Wallsediment W1 (③) in einer Mächtigkeit von wenigen Zentimetern ab. Der Sand stammt offenbar von äolischer Erosion auf Amrum.

Phase 6: Der Bau des Krümwaals beginnt. Menschen schütten das Wallsediment W2 (④) auf. Im linken Bereich der Kopfseite des Profils besteht es aus umgelagertem I Bv-Horizontmaterial, im rechten Teil ist es mit hellem Sand durchmischt.

Phase 7: Menschen schütten das Wallsediment W3 (⑤) auf. Dadurch ist der Wall nun knapp 20 cm hoch. Ein verkohltes Gerstenkorn aus dieser Schicht datiert in die Zeit cal AD 247-536 (95,4%; AMS-Labornummer COL6024.1.0.0.1).

Phase 8: Die Wallaufschüttung wird vermutlich über einige Jahre unterbrochen. Vegetation siedelt sich an. Im Wallsediment W2 bildet sich der schwache Humushorizont W2 Ah (⑥).

Phase 9: Menschen lagern das Wallsediment W3 (⑦) ab.

Phase 10 a: Menschen tragen nordöstlich außerhalb des ersten, noch sehr flachen Walls den Humushorizont W2 Ah, das darunterliegende, nicht durch Bodenbildung veränderte Wallsediment W2 sowie den Humushorizont I Ah und die obersten Zentimeter des I Bv-Horizontes der mittelholozänen Braunerde ab.

Phase 10 b: Menschen schütten das am nordöstlichen Wallfuss in Phase 10 a abgetragene Material auf dem Wall als Wallsediment W4 (⑧) auf.

Phase 11: Menschen schütten das humose, vermutlich in der Umgebung des Walls oberflächennah abgegrabene Wallsediment W5 (⑨) auf.

Phase 12: Menschen lagern lokal den kleinen Sandhaufen W6 (⑩) auf dem Wall ab.

Phase 13: Menschen schütten das Wallsediment W7 (⑪) ober- und unterhalb des Sandhaufens W6 auf den Wall.

Phase 14: Menschen schütten das mächtige bräunliche Wallsediment W8 (⑫) auf, das vermutlich aus in der Umgebung des Walls abgegrabenem B-Horizontmaterial der mittelholozänen Braunerde besteht. Die Holzkohle einer Hasel datiert in die Zeit cal AD 428-648 (95,4%; AMS-Labornummer COL6025.1.0.0.1).

Phase 15: Menschen tragen humose Plaggen als Wallsediment W9 (⑬) auf. Die humosen Plaggen begünstigen die anschließende Begrünung des Walls. Die Plaggen sind vergleichsweise standfest. Damit endet der Bau des schließlich 160 cm hohen Walls.

Phase 16: Auf dem fertiggestellten Wall beginnt Heidevegetation zu wachsen. Unter dieser bildet sich ein schwacher, bis zu 10 cm mächtiger Podsol (W9 Ae ⑭, W9 Bh ⑮)



Phase 17: Menschen zerstören die Heidevegetation am Wallfuss und in der Umgebung des Walls.

Phase 18: Äolische Erosion auf Amrum führt zur Ablagerung des mächtigen, aus hellem Sand bestehenden Wallsediments W10 (⑩/⑪) am nordöstlichen Wallfuss.

Phase 19: Ackerbau erfolgt im 20. Jahrhundert in Wallsediment W10. Das Resultat ist der Pflughorizont W10 Ap (⑪).

Phase 20: Lokal wird der Ackerbau am und um den Wall aufgegeben, nordöstlich des Walls die Öömrang-Skuul errichtet. Auf und um den Wall wächst dichte grasreiche Vegetation. Dadurch bildet sich auf dem Wall eine mächtige Humusauflage (Ad ⑫).

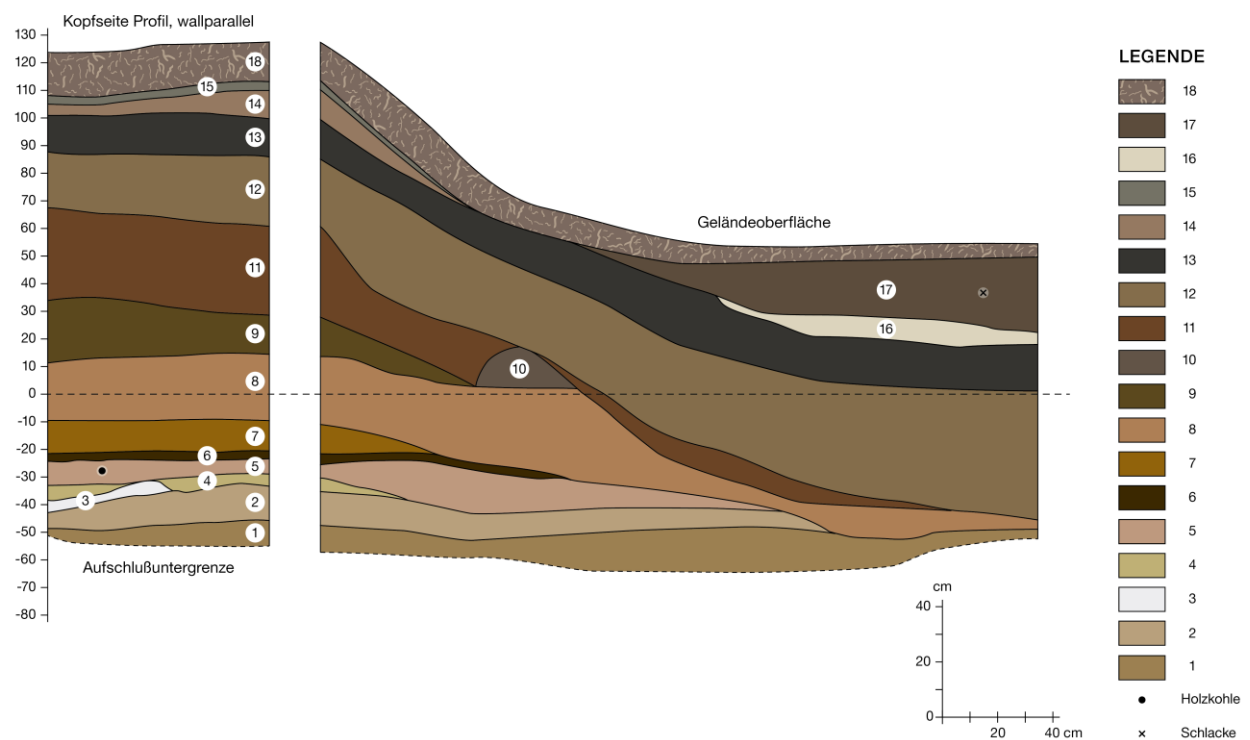


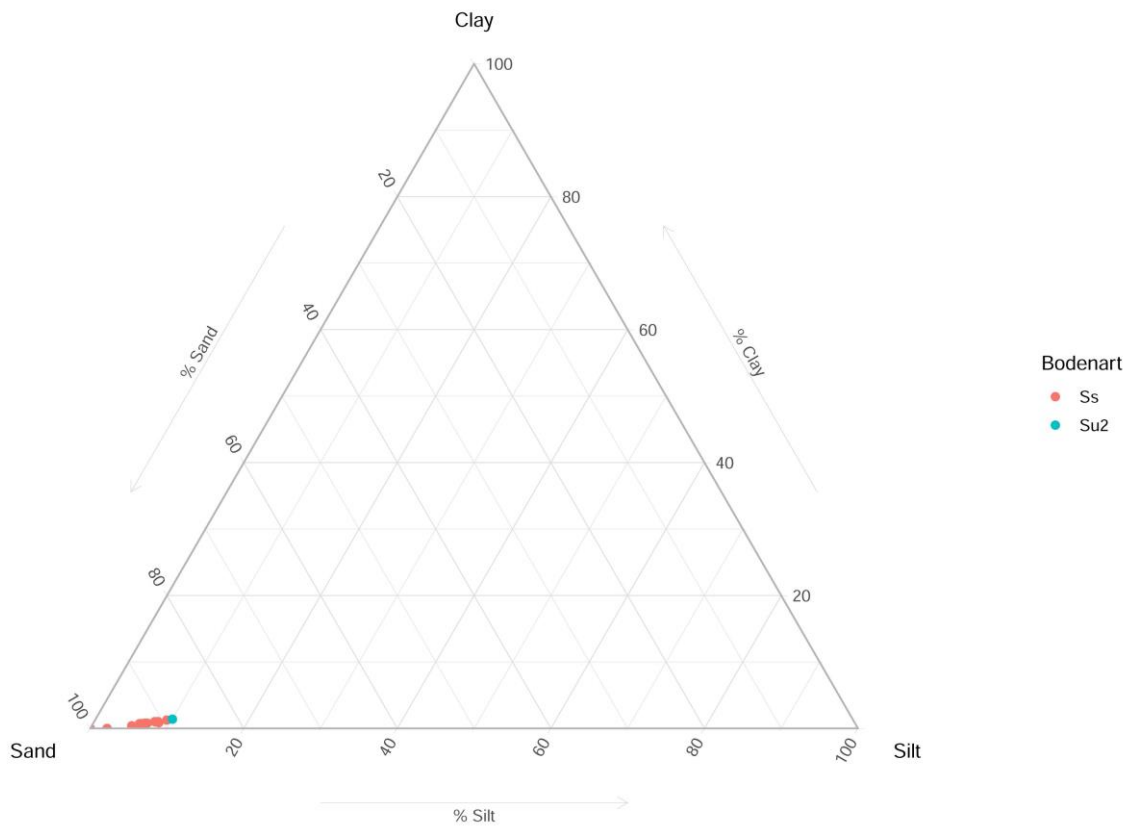
Abbildung 35: Profilzeichnung KRW 00 (Graphik: D. Kramer)

<b>Probe</b>	<b>pH</b>
W10 Ae	3,27
W10 Bh	3,27
W10	3,94
W9	3,69
W8	4,01
W7	4,15
W6	4,01
W5	4,01
W4	4,02
W3Ah	3,95
W3	3,95
W2	3,96
I Ah	3,98
I Bv	4,08

**Tabelle 17: Laboranalyse KRW 00**

<b>Probe</b>	<b>Ton %</b>	<b>Schluff %</b>	<b>Sand %</b>	<b>Symbol</b>	<b>Bezeichnung</b>
W10 Ae	0,79	6,68	92,53	Ss	reiner Sand
W10 Bh	0,86	8,50	90,64	Ss	reiner Sand
W10	0,00	0,00	100,0	Ss	reiner Sand
W9	0,73	6,17	93,10	Ss	reiner Sand
W8	0,71	6,05	93,24	Ss	reiner Sand
W7	0,70	6,48	92,82	Ss	reiner Sand
W6	1,01	7,89	91,09	Ss	reiner Sand
W5	0,97	8,02	91,01	Ss	reiner Sand
W4	0,40	5,20	94,39	Ss	reiner Sand
W3Ah	1,02	8,30	90,67	Ss	reiner Sand
W3	0,79	7,03	92,18	Ss	reiner Sand
W2	0,79	6,86	92,35	Ss	reiner Sand
I Ah	1,26	9,33	89,41	Ss	reiner Sand
I Bv	1,39	10,01	88,60	Su2	schwach schluffiger Sand

**Tabelle 18: Bodenarten KRW 00**



**Abbildung 36: Korngrößendreieck KRW 00**



**Abbildung 37: Wallparallele Kopfseite des Profils KRW 00 (Foto: S. Dazert)**



**Abbildung 38: Nördlicher Wallhang des Profils KRW 00 (Foto: J. Quedens)**



**Abbildung 39: Nördlicher Wallfuß des Profils KRW 00 (Foto: J. Quedens)**





**Abbildung 40: Nördlicher Wallfuß des Profils KRW 00 (Foto: J. Quedens)**

### 5.3 Der Standort KRW 01

#### 5.3.1 Stratigraphie KRW 01 (Amrum, Profil Krümwaal 01)

In der Saale-Kaltzeit lagern Schmelzwässer mächtige Vorschüttsande mit wechselnden Kiesgehalten ab (Phase 1). Periglaziäre Prozesse durchmischen die saalezeitlichen kiesigen Sande in der Weichsel-Kaltzeit (Phase 2).

Bereits während des frühen Neolithikums wird die Umgebung des untersuchten Profils gerodet und ackerbaulich genutzt. Starkniederschläge erodieren hangaufwärts Bodenmaterial und lagern im Bereich des Aufschlusses KRW 01 um 8200 BP ein etwa 20 cm mächtiges Kolluvium an (Phase 3). Unmittelbar danach öffnen und verfüllen Menschen eine Grube. Die Füllung enthält zahlreiche kleine Holzkohlefragmente (Phase 4). Der Standort bewaldet sich wieder. Unter dem Wald bildet sich bis in die Eisenzeit eine Braunerde mit  $A_h$ - $B_v$ -Horizonten (Phase 5). Lokal wird die Braunerde schwach lessiviert (Horizontfolge:  $A_h$ - $B_{bt}$ - $C_v$ ).

In der Spätantike wird ein erster flacher Wall aufgeschüttet (Phase 6, Wallsedimente 1 bis 3). Er besteht aus drei vergleichsweise homogenen schwach humosen sandreichen Paketen. Im Wall

bildet sich in Phase 7 parallel zur Walloberfläche eine schwach lessivierte Braunerde mit deutlich sichtbaren Toninfiltrationsbändern in Wallsediment 3 (Horizontfolge: A<sub>h</sub>-B<sub>bt</sub>-C<sub>v</sub>).

Es folgt ein mehrfacher Wechsel von Humifizierung, Vegetationsauflockerung und der Anwehung von hellen ausgesprochen humusarmen, 2 bis 6 cm mächtigen Sandlagen (Phase 8). Die Sande sind locker und sehr gut sortiert. Das Ergebnis sind bis zu fünf A<sub>h</sub>-Horizonte an der Ostflanke des Aufschlusses und von bis zu drei A<sub>h</sub>-Horizonten an der Westseite. Wahrscheinlich vollzog sich diese kurzfristige starke Dynamik von Bodenbildung und äolischer Erosion vom Hochmittelalter bis in die frühe Neuzeit. Abschließend wird in Phase 8 das bis über 40 cm mächtige Sandpaket M6 am Wallfuß abgelagert, das oberhalb auf dem Wall abgespült wurde.

Zum Ende des Zweiten Weltkrieges legten wohl Soldaten eine Grube auf dem Wall an. Sie ist verfüllt mit zerbrochenen Glasflaschen und Sand (Phase 9).

In jüngerer Zeit hat sich an der Oberfläche des Walls ein Humushorizont mit mächtigen Grassoden gebildet (Phase 10). Der Wall wird nicht gemäht. Eine Verbuschung hat lokal begonnen. Zahllose Kaninchen haben in den lockeren Wallsedimenten Bauten errichtet und die ursprünglichen Lagerungsverhältnisse und Befunde zerstört.

Der Wall verläuft von Westen nach Osten entlang einer leichten Senke, an die sich nach Norden und Osten Hänge anschließen. Auf den schwach konvexen Mittelhangabschnitten erodierten Starkniederschläge vermutlich seit dem hohen Mittelalter Bodenmaterial und lagerten dieses am Hangfuß ab, also an beiden Seiten des Walls. Diese Kolluvien verringerten ebenso wie Abtragung auf dem Wall in Phase 8 die Wallhöhe. Sie beträgt im Bereich des Aufschlusses heute nur noch maximal 125 cm. Nach der Wallanlage in der späten Römerzeit und vor der Ablagerung der Kolluvien war der Wall hier maximal 174 cm hoch und damit deutlich markanter als heute.

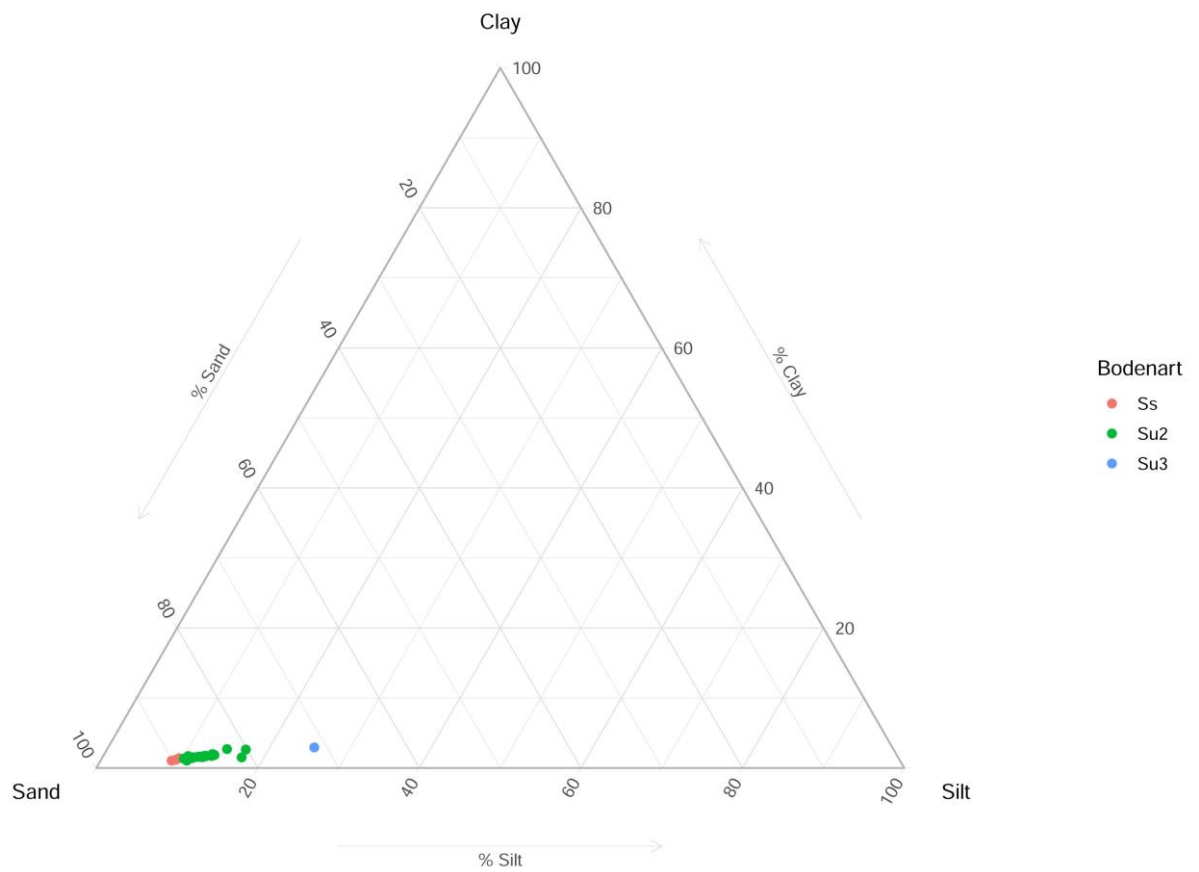


### **Stratigraphie des Profils KRW 01**

- |          |  |
|----------|--|
| Phase 1: | Ablagerung von Vorschüttssanden mit Kiesgehalten (Saale-Kaltzeit)  |
| Phase 2: | Durchmischung der saalezeitlichen kiesigen Sande in der Weichsel-Kaltzeit  |
| Phase 3: | Ablagerung eines 20cm mächtigen Kolluviums durch Erosion hangaufwärts um 8.200 BP  |
| Phase 4: | Öffnen und Verfüllen einer Grube durch Menschen um 8.200 BP  |
| Phase 5: | unter dem Wald bildet sich vermutlich eine Braunerde mit A <sub>h</sub> -B <sub>v</sub> -Horizonten. Braunerde z. t. schwach lessiviert, Horizontfolge: A <sub>h</sub> -B <sub>bt</sub> -C <sub>v</sub>  |
| Phase 6: | Aufschüttung eines Walls aus humosen Substrat A <sub>h</sub> / A <sub>p</sub> um 2.200 BP  |
| Phase 7  | Bildung einer schwach lessivierten Braunerde mit deutlich sichtbaren Toninfiltrationsbändern A <sub>h</sub> -B <sub>bt</sub> -C <sub>v</sub>   |
| Phase 8  | mehrfacher Wechsel von Humifizierung, Vegetationsauflockerung und Anwehung von hellen humusarmen, 2 bis 6 cm mächtigen Sandlagen. Nordflanke bis zu 5 A <sub>h</sub> Horizonte, Südflanke bis zu 3 A <sub>h</sub> Horizonte. Abschließend wird das bis über 40 cm mächtige Sandpaket M6 am Wallfuß abgelagert. |
| Phase 9  | Anlage einer Grube (Soldaten im 2. Weltkrieg), verfüllt mit zerbrochenen Glasflaschen und Sand   |
| Phase 10 | Bildung eines Humushorizontes (A <sub>h</sub> ) an Oberfläche des Walls mit mächtigen Grassoden, z. T. verbuscht   |

<b>Probe</b>	<b>Ton %</b>	<b>Schluff %</b>	<b>Sand %</b>	<b>Symbol</b>	<b>Bezeichnung</b>
110 cm über Null	1,54	12,37	86,09	Su2	schwach schluffiger Sand
100 cm	2,70	14,83	82,47	Su2	schwach schluffiger Sand
90 cm	2,64	17,19	80,17	Su2	schwach schluffiger Sand
80 cm	2,00	13,37	84,64	Su2	schwach schluffiger Sand
70 cm	1,67	12,41	85,92	Su2	schwach schluffiger Sand
60 cm	1,50	10,68	87,82	Su2	schwach schluffiger Sand
50 cm	1,57	11,92	86,51	Su2	schwach schluffiger Sand
40 cm	1,42	10,84	88,10	Su2	schwach schluffiger Sand
30 cm (Humus)	1,86	13,70	84,44	Su2	schwach schluffiger Sand
30 cm	1,68	12,73	85,60	Su2	schwach schluffiger Sand
20 cm	1,62	11,95	86,42	Su2	schwach schluffiger Sand
20 cm bei 12,4m	1,19	9,25	89,56	Ss	reiner Sand
10 cm	1,60	11,78	86,62	Su2	schwach schluffiger Sand
10 cm bei 13,5m	1,40	9,55	89,04	Ss	reiner Sand
0	1,76	12,62	85,62	Su2	schwach schluffiger Sand
-10 cm unter Null	1,54	11,22	87,24	Su2	schwach schluffiger Sand
-15 cm	1,70	10,53	87,77	Su2	schwach schluffiger Sand
-20 cm	1,33	10,16	88,50	Su2	schwach schluffiger Sand
-30 cm	1,43	11,23	87,34	Su2	schwach schluffiger Sand
-40 cm	1,51	11,15	87,34	Su2	schwach schluffiger Sand
-50 cm	1,43	10,90	87,67	Su2	schwach schluffiger Sand
-58 cm	1,72	13,43	84,85	Su2	schwach schluffiger Sand
-60 cm	1,05	8,80	90,15	Ss	reiner Sand
-70 cm	1,05	10,68	88,27	Su2	schwach schluffiger Sand
-75 cm	2,94	25,51	71,55	Su3	mittel schluffiger Sand
-80 cm	1,51	17,24	81,26	Su2	schwach schluffiger Sand

**Tabelle 19: Bodenarten KRW 01**



**Abbildung 41: Korngrößendreieck KRW 01**



**Abbildung 42: Drohnfoto vom Profil KRW 01 (Foto: B. Bork)**





**Abbildung 43: Gesamtansicht KRW 01 (Foto: S. Khamnueva-Wendt)**



**Abbildung 44: Profil KRW 01, Ostseite, Sand-Humus-Bänder (Foto: S. Khamnueva-Wendt)**



## 5.4 Meeram

Die Abbildungen 46 und 47 in Abschnitt 5.4.1 veranschaulichen die Lage der Bohrungen MER 01 und MER 03 nördlich und nordwestlich der Vogelkoje am östlichen Rand des Dünen-gebietes im Untersuchungsgebiet Meeram im Nordwesten von Amrum. Beide Bohrungen liegen am Rand von mehrere Meter hohen Dünen.

Es folgen Kurzbeschreibungen der Stratigraphie des Bohrprofils MER 01 (Abschnitt 5.5.1) und der Bodenarten von MER 01 (5.5.2, 5.5.3) sowie der Stratigraphie des Bohrprofils MER 03 (5.6.1) und der Bodenarten von MER 03 (5.6.2, 5.6.3).



Abbildung 45: Lage der Bohrungen Meeram (Graphik: S. Dazert)



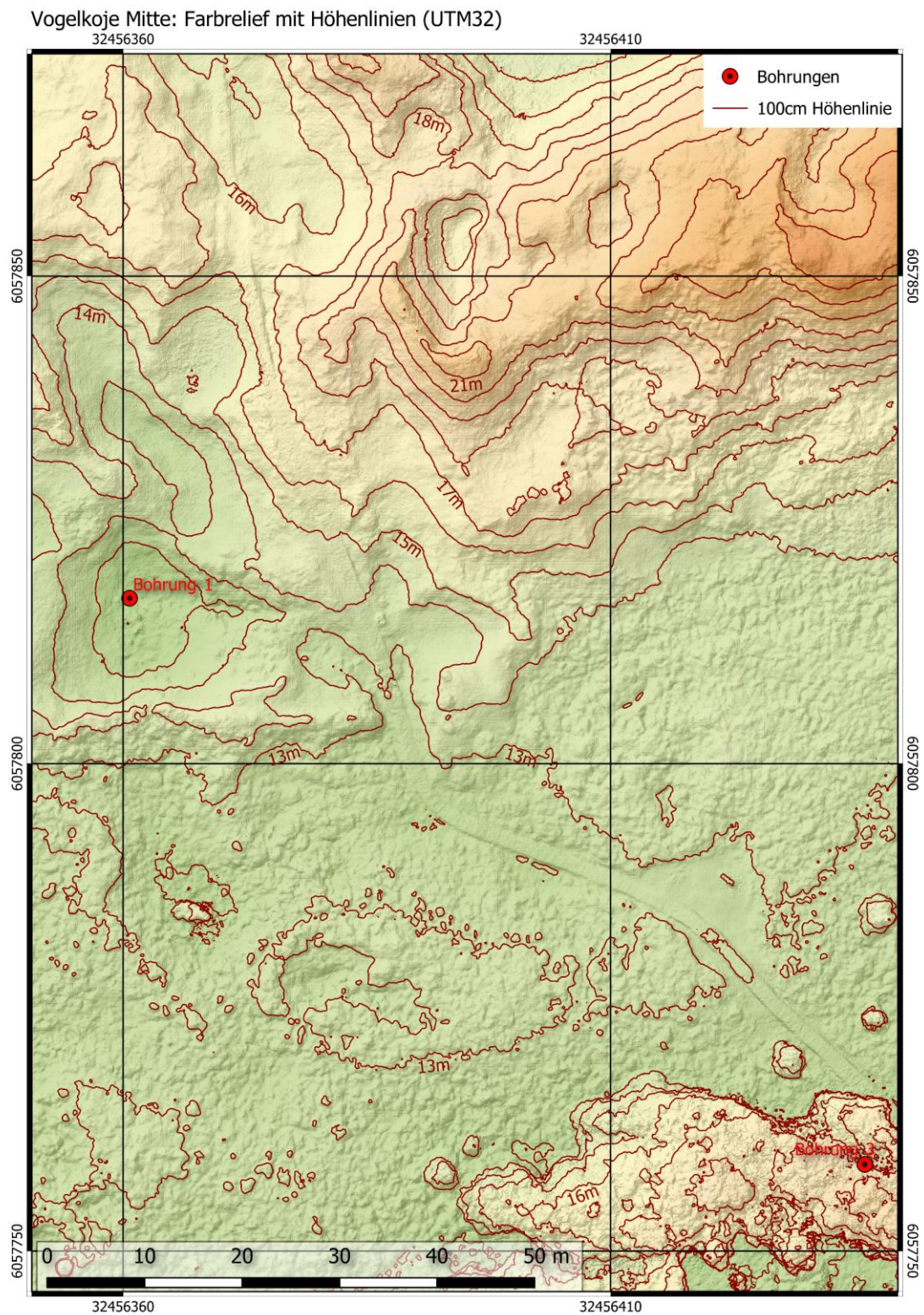


Abbildung 46: Meeram, Farbreliet mit Höhenlinien (Geländemodell: F. Bauer)



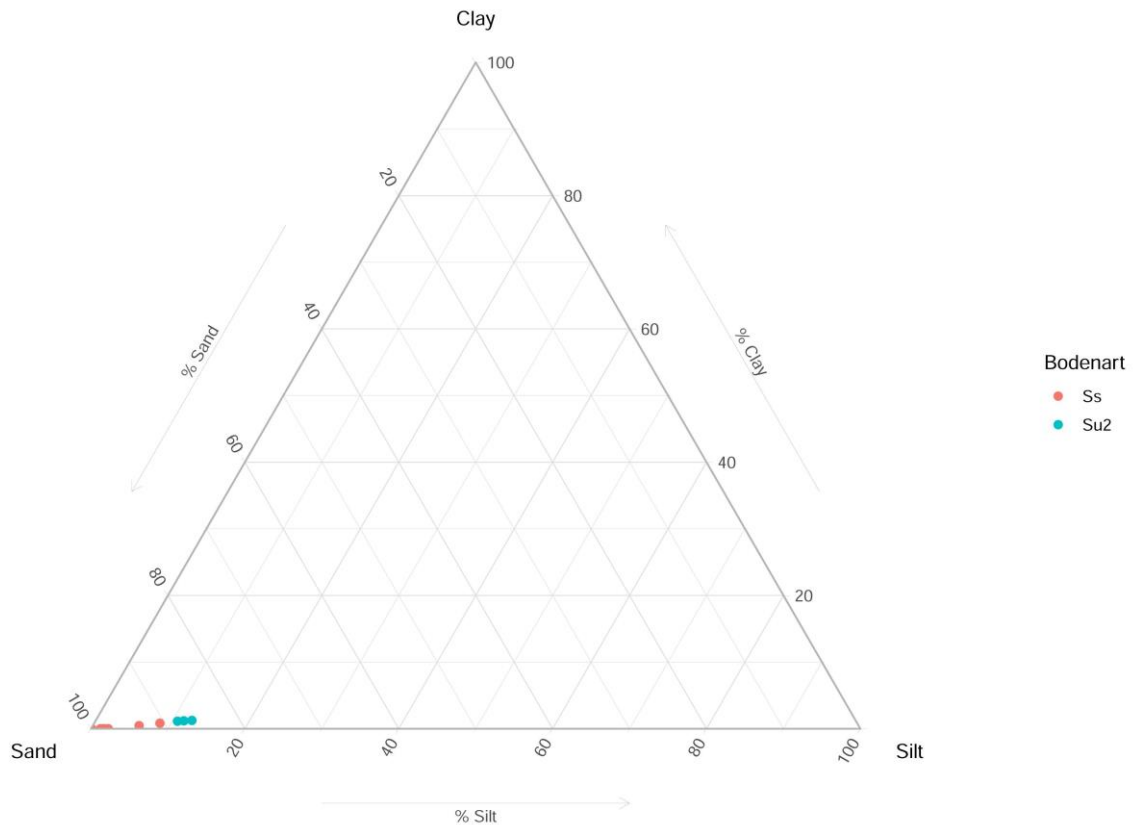
#### 5.4.1 Stratigraphie der Bohrung MER 01

Tiefe in cm unter Geländeoberfläche

0-5	VIAi	initialer rezenter Humushorizont
5-47	VICv	Flugsand
47-62	VGo	Flugsand, mit Oxidationsmerkmalen
62-84	IVGr	Flugsand mit schwach humosen Bändern, heute reduziert durch Grundwassereinfluss
84-92	IIIGr fAh3	Humushorizont in Flugsand, im unteren Teil schwach geschichtet, heute reduziert
92-95	IIIGr	geschichtete Sande, wenige Grobsandbänder, viele Mittelsandbänder, Mittelsand humoser als Grobsand, heute reduziert
95-100	IIGr fAh2	Humushorizont in Flugsand, heute reduziert
100-113	IIGr	Sande, heute reduziert
113-116	IGr fAh1	Humushorizont in Flugsand, heute reduziert
116-120	IGr	humoser Sand, heute reduziert
120-140	Hn	Niedermoor
140-149	Fm	Organo-mineralische Mudde; etwas heller und geringere Gehalt an organischer Substanz als Hn
149-156	ICv	pleistozänes Sediment (Grobsand und Schotter)

Probe	Ton %	Schluff %	Sand %	Symbol	Bezeichnung
15 – 20 cm	0,00	0,00	100,00	Ss	reiner Sand
20 – 30 cm	0,00	0,00	100,00	Ss	reiner Sand
30 – 40 cm	0,00	0,00	100,00	Ss	reiner Sand
40 – 47 cm	0,00	0,00	100,00	Ss	reiner Sand
47 – 54 cm	0,00	0,00	100,00	Ss	reiner Sand
54 – 62 cm	0,00	0,00	100,00	Ss	reiner Sand
62 – 74 cm	0,00	0,00	100,00	Ss	reiner Sand
74 – 84 cm	0,00	0,00	100,00	Ss	reiner Sand
84 – 92 cm	0,00	1,24	98,76	Ss	reiner Sand
92 – 95 cm	0,00	1,71	98,29	Ss	reiner Sand
95 – 100 cm	0,00	0,11	99,89	Ss	reiner Sand
113 – 116 cm	0,00	2,25	97,75	Ss	reiner Sand
116 – 120 cm	0,00	1,45	98,55	Ss	reiner Sand
120 – 130 cm	0,46	6,02	93,51	Ss	reiner Sand
130 – 140 cm	0,83	8,55	90,63	Ss	reiner Sand
140 – 149 cm	1,25	12,49	86,26	Su2	schwach schluffiger Sand
149 – 150 cm	1,19	11,47	87,34	Su2	schwach schluffiger Sand
150 – 156 cm	1,12	10,68	88,20	Su2	schwach schluffiger Sand

Tabelle 20: Bodenarten MER 01



**Abbildung 47: Korngrößendreieck MER 01**

#### 5.4.2 Stratigraphie der Bohrung MER 03

Tiefe in cm unter Geländeoberfläche

+4-0	O	Humusauflage
0-38	VIAh	Humushorizont, der durch Flugsandakkumulation langsam aufgewachsen ist
38-89	VAi im Wechsel mit VCv	Flugsande mit mehreren, wenige Millimeter bis 1,5 cm mächtigen Humushorizonten
89-103	IVCv	schwach humose Flugsande
103-113	IIIfAh	Humushorizont in Flugsanden
113-120	IIICv	schwach humose Flugsande
120-135	Hn	Niedermoor
135-149	Fm	Anmoor, mit schwachen Oxidationsmerkmalen
149-157	IIGo	grobsandiger Kies
157-166	IGo	saalezeitliche glazifluviale Sande mit Oxidationsflecken

Probe	Ton %	Schluff %	Sand %	Symbol	Bezeichnung
17 – 26 cm	0,00	0,00	100,00	Ss	reiner Sand
26 – 38 cm	0,00	0,00	100,00	Ss	reiner Sand
38 – 44 cm	0,00	0,00	100,00	Ss	reiner Sand
44 – 48,5 cm	0,00	0,00	100,00	Ss	reiner Sand
48,5 – 55,5 cm	0,00	0,00	100,00	Ss	reiner Sand
55,5 – 63 cm	0,00	0,00	100,00	Ss	reiner Sand
63 – 76 cm	0,00	0,00	100,00	Ss	reiner Sand
76 – 77,5 cm	0,00	0,00	100,00	Ss	reiner Sand
77,5 – 88,5 cm	0,00	0,00	100,00	Ss	reiner Sand
88,5– 100 cm	0,00	0,00	100,00	Ss	reiner Sand
100– 114 cm	0,00	4,43	95,57	Ss	reiner Sand
114 – 120 cm	0,08	5,32	94,60	Ss	reiner Sand
120 – 128 cm	1,05	7,18	91,77	Ss	reiner Sand
128 – 135 cm	1,33	11,76	86,90	Su2	schwach schluffiger Sand
135 – 142 cm	1,54	13,05	85,42	Su2	schwach schluffiger Sand
142 – 148 cm	2,14	18,35	79,51	Su2	schwach schluffiger Sand
148 – 157 cm	2,80	19,07	78,13	Su2	schwach schluffiger Sand
157 – 166 cm	1,72	13,08	85,20	Su2	schwach schluffiger Sand

Tabelle 21: Bodenarten MER 03

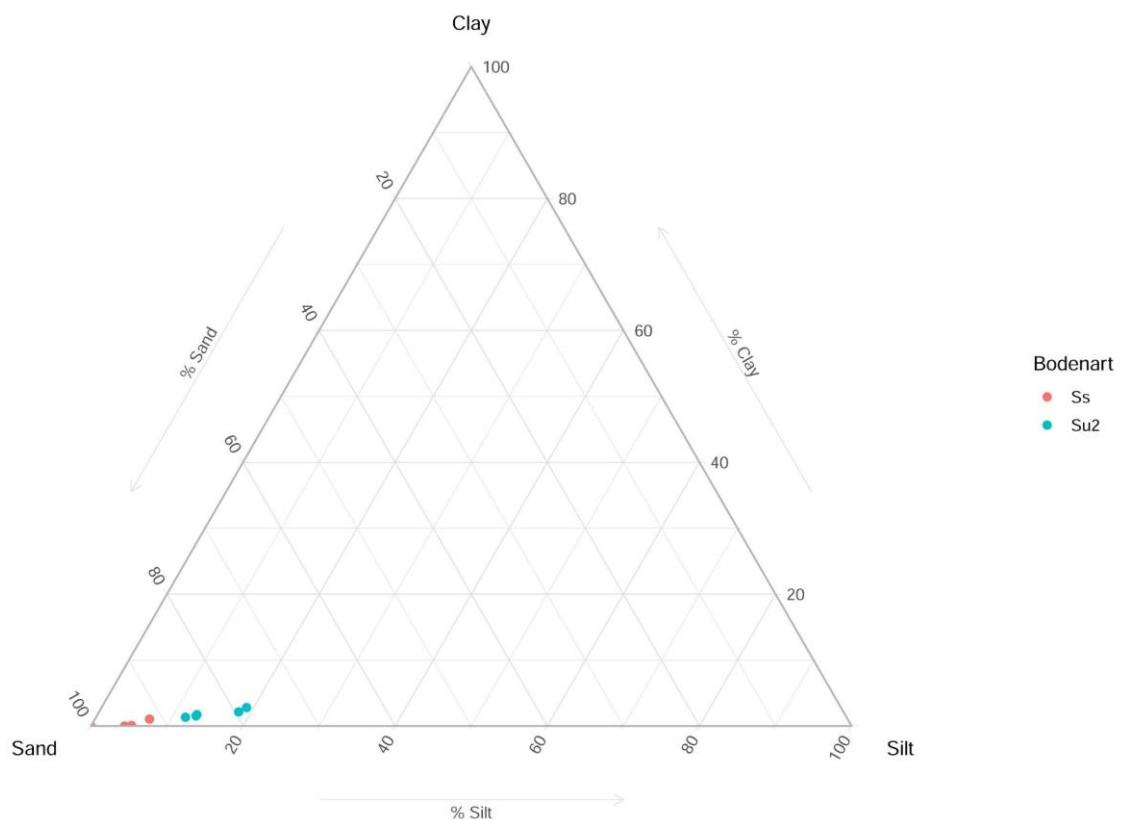


Abbildung 48: Korngrößendreieck MER 03

#### 5.4.3 Dünendynamik und Bodenbildung bei Meeram

Da die Dünenbildung auf Amrum erst um 1400 n. Chr. begann, kann die Sandanwehung auch bei Meeram frühestens in dieser Zeit eingesetzt haben (Quedens et al., 1991).

Die beiden exemplarisch vorgestellten Bohrprofile aus dem Untersuchungsgebiet Meeram an der Amrumer Vogelkoje belegen den häufigen Wechsel zwischen äolischer Dynamik und der Besiedlung der abgelagerten Sande mit Vegetation und dadurch ermöglichter Humifizierung an der östlichen Peripherie des Dünengürtels. Diese Wechsel halten bis heute an. In der Umgebung der Bohrungen existieren nebeneinander kleinere vegetationsfreie Blößen und ausgedehnte bewachsene Dünenbereiche

Die Flugsande überdecken ein auf dem Geestkern liegendes ehemaliges Feuchtgebiet, in dem vor dem Beginn der Sandanwehungen ein Niedermoor aufwuchs.

## 6. Gesamtinterpretation

### 6.1 Die Flur Waldhusen im Watt nördlich Pellworm

Die im vierten Kapitel im Detail beschriebenen, unmittelbar nördlich von Pellworm im heutigen Watt in der ehemaligen Flur Waldhusen in zwei kleinen unmittelbar benachbarten Gebieten untersuchten acht Profile verdeutlichen die gravierende kleinräumige Ökosystemdynamik durch Transgressions- und Regressionsphasen, durch die Gezeiten sowie durch die unterschiedlichen und wechselnden Strömungsverhältnisse, die eine lokal sehr verschiedenartige natürliche Erosions- und Akkumulationsdynamik bedingten. Sie führten in Waldhusen bereits vor mehr als 3000 Jahren zur Akkumulation mächtiger schluff- bzw. sandreicher Kleie. Die Dynamik zeigt weiterhin, dass die Vegetation in Regressionsphasen die Kleie zurückeroberte. Dadurch entwickelten sich an den nach wie vor meist sehr feuchten Standorten ausgeprägte Humushorizonte mit hohen Gehalten an organischer Substanz, so insbesondere in der späten Bronzezeit. Die seitdem fast beständig hohe Bodenfeuchte verhinderte eine stärkere Mineralisierung der organischen Substanz.

Die geoarchäologischen Untersuchungen belegen die auch in der Flur von Waldhusen intensiven und arbeitsreichen Versuche von Menschen, diesen Raum im hohen und späten Mittelalter sowie in der frühen Neuzeit dauerhaft großflächig landwirtschaftlich nutzbar zu machen. Teilweise bereits im Frühmittelalter angelegte Warften wurden erhöht und mit Gräben gesichert, flache Brunnen wurden in Warftnähe geöffnet und genutzt.

Ausgeklügelte Entwässerungssysteme wurden jeweils vor den beiden Großen Mandränken im Januar 1362 und im Oktober 1634 mit einem großen Arbeitsaufwand angelegt. Sie umfassten parallele Entwässerungsgräben, die nach der Öffnung gezielt mit – im Vergleich zu den umgebenden Kleien – weitaus wasserdurchlässigeren Torfen verfüllt worden waren.

Die in den Jahren und Jahrzehnten vor der Sturmflut im Januar 1362 genutzten Gräben waren 1,40 m bis 1,95 m breit. Die horizontalen Abstände zwischen den jeweiligen Grabenrändern lagen zwischen 9,3 m und 13,6 m. Die Torffüllungen verlangsamten einerseits die Wasserströmung in den Gräben entscheidend und verhinderten so fraglos Tiefenerosion in den Gräben und auch

eine laterale Erosion der genutzten Interfluvien. Andererseits besaßen die torfreichen Gräben eine gewisse Entwässerungsfunktion in den Interfluvien. Der Grundwasserspiegel wurde dort um einige Dezimeter abgesenkt. Diese garantierte eine vergleichsweise starke Biomassezunahme und damit Erträge im Dauergrünland.

Vereinzelt wurden Überreste von Wald im Watt gefunden (Wolters et al., 2016). Vermutungen des Leiters des Rungholt-Museums auf Pellworm, Helmut Bahnsen (frdl. mündl. Mitt.), es handele sich aufgrund der Funde von Koniferenzapfen auf Humushorizonten in Waldhusen auch hier um Relikte von Waldböden, konnten nicht bestätigt werden. Die sehr jungen Koniferenzapfen wurden vielmehr dort angespült. Die Makroreste (z.B. der hohe Bodenfeuchte anzeigende Fieberklee *Menyanthes trifoliata*) in einigen Humushorizonten in der Flur von Waldhusen belegen vielmehr, dass sich Dauergrünland entwickelt hatte.

Die durch die zweite Große Mandränke im Oktober 1634 überfluteten Gräben waren 1,0 m bis 2,35 m breit und die horizontalen Abstände zwischen ihnen wesentlich größer als bei den im Januar 1362 zerstörten Gräben. Sie lagen zwischen 44,6 m und 71,5 m. Die Torfe dienten auch hier einerseits der Stabilisierung der Grabenwände und andererseits einer langsamen, störungsfrei verlaufenden Entwässerung an den Standorten mit hohem Grundwasserstand. Der größere Grabenabstand bewirkte eine geringere Absenkung des Grundwasserspiegels in den Interfluvien im Vergleich zu der Landnutzungsphase vor der Ersten Groten Mandränke. Die Grünlanderträge dürften daher im Mittel geringer gewesen sein als vor 1362.

Jedoch waren alle Maßnahmen der Inkulturnahme letztlich vergeblich. Die gewaltigen Veränderungen durch die beiden Sturmfluten vom 15. bis zum 17. Januar 1362 und in der Nacht vom 11. auf den 12. Oktober 1634 sind bis heute im Luftbild und in den Grabungen gut sichtbar, auch wenn die Feststoffdynamik der Gezeiten alljährlich manche Strukturen im Oberflächenbild zeitweilig oder für immer verschwinden und andere (wieder) auftauchen lässt.

Das Ausbleiben deichbrechender Sturmfluten – manchmal über viele Generationen – wiegte Menschen bis in die jüngste Zeit immer wieder in einer trügerischen Sicherheit, zuletzt vor der dramatischen Sturmflut am 16./17. Februar 1962, während der in Hamburg 315 Menschen starben (Bork, 2020).



Das Ausmaß der beiden Mandränken überraschte die sich hinter den Deichen sicher fühlenden Menschen vollkommen. Auch daher waren die Verluste an Menschenleben 1362 und 1634 so hoch. Ein erheblicher Teil der heute zwischen den nordfriesischen Inseln und dem Festland liegenden Marschen ging dauerhaft verloren (vgl. Prange, 1965; Petersen & Rohde, 1977; Newig, 2004; Rieken, 2008; Meier, 2012).

## 6.2 Der Krümwaal auf Amrum

Durch den zentralen und den nördlichen Teil des Krümwaals wurden an der Öömrang-Schule und am östlichen Ende des morphologisch gut sichtbaren Wallabschnitts Profile aufgenommen, analysiert und im fünften Kapitel beschrieben. Dabei wurden am Krümwaal einige Besonderheiten gefunden.

Unerwartet früh, bereits um 8200 BP und damit im Mesolithikum, wurde die Gehölzvegetation im Bereich des späteren Krümwaals gerodet und in Kultur genommen. Dies bezeugen ein in diese Zeit datiertes Kolluvium und eine im Kolluvium angelegte Grube. Bald darauf wurde die landwirtschaftliche Nutzung wieder aufgegeben. Der Standort bewaldete sich wieder.

In saalezeitlichen kiesigen Sanden und in dem darüber liegenden, mehr als acht Jahrtausende alten Kolluvium bildete sich über das Neolithikum bis zur ersten Wallanlage unter Wald eine Braunerde, die bis heute fast vollständig und kaum verändert erhalten geblieben ist. In einem schmalen Abschnitt existiert sogar noch der ursprüngliche Humushorizont der Braunerde – ein sehr seltener Befund, da an den meisten Standorten in Mitteleuropa vor allem die Dynamik des Klimas, die Landnutzungssysteme, äolische oder fluviatile Bodenerosion und Sedimentation die früh- und mittelholozänen Böden während des Jungholozäns wesentlich verändert haben.

Auf der mittelholozänen Braunerde wurde nach der Waldrodung der Krümwaal in mehreren Bauphasen errichtet. Erstmals gelang eine recht genaue Datierung des Baubeginns des Krümwaals. Die Radiokohlenstoffdatierungen eines verkohlten Gerstenkorns und einer verkohlten Hasel (also von zwei ausgesprochen kurzlebigen organischen Resten) aus dem untersten Teil des Krümwaals unweit der heutigen Öömrang-Skuul belegen, dass die Anlage eines ersten, nur wenige Dezimeter hohen Walls hier am Profil KRW 00 bereits in der Spätantike

erfolgte. Radiokohlenstoffdatierungen der ältesten Wallsedimente im östlichen Bereich des Krümwaals am Profil KRW 01 belegen für diesen Standort gar den initialen Bau bereits kurz vor der Zeitenwende. Wahrscheinlich begann der Bau des Krümwaals damit in etwa hier – schon vor mehr als 2.000 Jahren. Einige Jahrhunderte später wurde der Wall dann nach Westen zumindest bis in den Bereich der heutigen Öömrang-Schule verlängert.

Möglicherweise handelte es sich bei dem ersten flachen und schmalen Wall um eine gezielt befestigte und morphologisch hervorgehobene Flur- oder Siedlungsgrenze. Dieser unterste Teil des heutigen Walls ist damit erheblich älter als erwartet. Er wurde vor der im sechsten Jahrhundert beginnenden Spätantiken Kleinen Eiszeit (vgl. Bork, 2020) angelegt, die nach unseren Untersuchungen auch auf Amrum zu einem Siedlungsabbruch führte.

Belegt ist die Wiederbewaldung in der Spätantike durch eine geringmächtige lessivierte Braunerde mit ausgeprägten dünnen Toninfiltrationsbändern, die sich in den antiken Wallsedimenten während des Frühmittelalters bildete.

Wohl ab etwa 1400 n. Chr. wurden Teile des Waldes auf Amrum und auch der Bereich des Krümwaals erneut gerodet (Quedens et al, 1991). Das ermöglichte die Verwehung von Flugsanden.

In dieser Zeit wurde der Bau des Krümwaals nach einer viele Jahrhunderte langen Unterbrechung fortgesetzt. Stabile, humose Plaggen wurden im Wallanschnitt an der heutigen Schule aufgetragen, bis der Wall eine Höhe von deutlich mehr als eineinhalb Metern erreichte. Die Plaggen besaßen bereits beim Auftrag niedrige pH-Werte um 4.

Nach dem Abschluss des Baus entwickelte sich unter Heidevegetation ein geringmächtiger Podsol parallel zur Walloberfläche.

Die Heidevegetation wurde in der näheren oder weiteren Umgebung des Walls wiederholt zerstört, möglicherweise für Ackerbau, durch die Entnahme von Plaggen oder durch lokal sehr intensive Beweidung. Kräftige Stürme wehten auf den vegetationsfreien Flächen Sande ab und lagerten diese im Lee des Krümwaals ab. Ein mächtigeres äolisches Sandpaket wurde am Profil

KRW 00 gefunden. Am Profil KRW 01 wurde in den sechs Phasen Sand angeweht. Zwischen den kurzen Verwehungsphasen siedelte sich dort jeweils wieder Vegetation an, unter der sich fünf geringmächtige, schwache Humushorizonte bildeten.

Im 20. Jahrhundert wurde in Wallnähe noch existierende Heidevegetation umgebrochen und mit dem Ackerbau begonnen. Hiervon zeugen Pflughorizonte, die am Profil KRW 01 bis unmittelbar an den Fuß des Walls reichen. Auf den benachbarten ackerbaulich genutzten Hängen abgespülte Bodenpartikel wurde auf beiden Seiten des Walls als Kolluvien abgelagert. Dadurch verringerte sich die Höhe des Walls am Profil KRW 01 von ursprünglich 174 cm auf die heute noch sichtbaren maximal 125 cm. Der Krümwaal war also ursprünglich morphologisch deutlich markanter als heute.

### 6.3 Das Untersuchungsgebiet Meeram am Dünenrand im Nordwesten von Amrum

Die beiden Bohrkern MER 01 und MER 03 belegen nachdrücklich die oftmals starke spätmittelalterlich-neuzeitliche äolische Geomorphodynamik am östlichen Rand des Amrumer Dünengürtels.

Diese äußert sich in der häufigen Akkumulation von Flugsanden. Unterbrochen wurde diese von sturmarmen Phasen bzw. von Zeiten, in denen die Sandquelle, der westlich anschließende Dünengürtel, dicht mit Vegetation bewachsen oder der Kniepsand schmal war. In sehr kurzen Phasen geomorphodynamischer Stabilität bildeten sich initiale Humushorizonte, in längeren mächtigere Humushorizonte. Gelegentlich finden beide Prozesskomplexe – die Sandverlagerung und die Bodenbildung – annähernd synchron statt. Voraussetzung ist die Anwehung einer nur geringen Menge an Sanden, die nicht ausreicht, die Vegetation vollständig zu begraben und zu ersticken. Dann wachsen die Humushorizonte mit der Vegetation und den angewehten Sanden ganz allmählich in die Höhe, bis entweder die Sandakkumulation endet oder zu stark wird.

An der Basis des im Laufe des Mittelalters und der Neuzeit während der Phasen mit äolischer Geomorphodynamik allmählich aufgewachsenen Dünenkörpers liegen jeweils in mehr als 120 cm Tiefe unter der rezenten Geländeoberfläche zwei sehr verschiedenartige Bildungen: ein Niedermoor über einem Anmoor und darunter die saalezeitlichen glazifluvialen Ablagerungen

des Geestkerns. Sie belegen eine ausgedehnte, starke Vernässung der Standorte in den Jahrhunderten vor dem Beginn der Dünenbildung.

#### 6.4 Vergleich der Geoökodynamik der Ökosysteme Marsch/Watt und Geestkerninsel

Die vor Pellworm im heutigen Watt und auf Amrum im heutigen Dünengürtel und auf der Geest am Krümwaal exemplarisch untersuchten, sehr verschiedenartigen Standorte belegen die hohe räumliche und zeitliche Variabilität der mittel- und jungholozänen Ökosystementwicklung im äußersten Westen Nordfrieslands.

Der große Arbeitseinsatz der Bewohnerinnen und Bewohner der Marschen und ihre präzisen Kenntnisse zu den Gezeiten und zu dem Lebensraum insgesamt ermöglichten ihnen den Umgang mit dem allmählichen, von mehreren Regressionsphasen unterbrochenen Meeresspiegelanstieg und eine manchmal Jahrhunderte andauernde erfolgreiche Nutzung der fruchtbaren, kalkhaltigen Kleie – zunächst in der Umgebung ihrer Warften, später in den eingedeichten Marschen. Während es den Menschen durchaus gelang, auf langsam verlaufende Prozesse meistens rechtzeitig zu reagieren, trafen sie extreme Sturmfluten unerwartet und daher äußerst schwer. Zahllose Menschen verloren dann ihr Leben, die Überlebenden ihr Hab und Gut. Fruchtbare Kulturland ging großflächig verloren. Wiedereindeichungen gelangen nur begrenzt.

Andererseits haben sich auf diesem Weg wissenschaftlich sehr wertvolle Ökotope erhalten, die nach den großen Sturmfluten im hohen und späten Mittelalter sowie in der frühen Neuzeit nicht mehr wesentlich anthropogen überprägt wurden. So können manche früheren Ökosystemzustände recht genau rekonstruiert werden.

Ganz anders waren die Geomorphodynamik und die Nutzbarkeit auf der Amrumer Geest. Hier verschlechterte sich die meist ohnehin nicht hohe Bodenfruchtbarkeit bald durch die landwirtschaftliche Nutzung, gelegentlich bereits innerhalb weniger Jahre oder Jahrzehnte. Nährstoffarme Böden bildeten sich; Bodenpartikel wurden in großem Umfang verweht und abgespült. Braunerden wurden während starker Stürme oder durch Starkniederschläge teilweise erodiert. Podsole bildeten sich unter Heidevegetation, deren Oberböden wiederum abgeplaggt und dem Ackerland zugeführt wurden. Die Böden spiegeln summarisch die vielfachen

Änderungen der natürlichen und der anthropogenen Rahmenbedingungen wider. Meist sind die Böden auf der Geest, die sich in den klimatisch oder hinsichtlich der Landnutzung verschiedenartigen Phasen des Holozäns gebildet haben, jedoch räumlich derart in einander verschachtelt, dass eine präzise Entzifferung und zeitliche Differenzierung der Bildungsprozesse nicht mehr möglich sind.

Daher war es erforderlich, besonders geeignete Akkumulationsstandorte am östlichen Dünenrand bei Meeram und am Krümwaal auf der Amrumer Geest zu identifizieren und zu untersuchen. Hier konnten die relevanten Prozesse der mittel- und jungholozänen Landschaftsformung identifiziert und natürliche sowie anthropogene Einflüsse gut unterschieden werden. Phasen der geomorphodynamischen Stabilität mit Bodenbildung unter anthropogen beeinflusster Vegetation und kurze Phasen mit anthropogen bedingter geomorphodynamischer Teilaktivität mit Verwehung und Abspülung konnten unterschieden werden. Dabei gelang es auch, ein bedeutendes Kulturdenkmal auf Amrum, den Krümwaal, erstmals zu datieren und seine Entwicklung präzise zu rekonstruieren. Sein Bau begann bereits vor der Zeitenwende und nicht – wie nach Angaben in der Literatur zu erwarten (Quedens et al. 1991) – erst im Frühmittelalter.

## 7. Literatur

- Ahrendt, K. (2007). Vergangenheit und Zukunft des nordfriesischen Wattenmeeres. *Coastline Reports*, 9, 45–57.
- Bahnsen, H., Brauer, R. & Mertens, C. (2014). Im Meer versunken: Rungholt, die Insel Strand und das geheimnisvolle Abalus. Husum Druck- und Verlagsgesellschaft, Husum.
- Bantelmann, A. (1939). Das nordfriesische Wattenmeer, eine Kulturlandschaft der Vergangenheit. *Westküste*, 2(1), 1–115.
- Bantelmann, A. (1966). Die Landschaftsentwicklung an der schleswig-holsteinischen Westküste, dargestellt am Beispiel Nordfriesland. Eine Funktionschronik durch fünf Jahrtausende. *Die Küste*, 14 (2), 5–99.
- Bantelmann, A. (1992). Landschaft und Besiedlung Nordfrieslands in vorgeschichtlicher Zeit. Husum Druck- und Verlagsgesellschaft, Husum.
- Bauer, R., Wickerling, A. & Mertens, C. (2009). Rungholt und die Insel Strand: Im Meer vergangen. Boyens Buchverlag, Heide.
- Behre, K.-E. (2000). Wie der Mensch die Küste eroberte. In Newig, J. & Theede, H.(Ed.), *Sturmflut. Gefährdetes Land an der Nordseeküste*, 76–97. Ellert & Richter, Hamburg.
- Behre, K.-E. (2005). Meeresspiegelanstieg - Marschentwicklung - Küstenlinien. Die letzten 10.000 Jahre an der deutschen Nordseeküste im Zeitraffer. *Schriftenreihe des Landesmuseums Natur und Mensch* 33, 7–19.
- Behre, K.-E. (2007). A new Holocene sea-level curve for the southern North Sea. *Boreas*, 36(1), 82–102. <https://doi.org/10.1080/03009480600923386>
- Behre, K.-E. (2008). Landschaftsgeschichte Norddeutschlands: Umwelt und Siedlung von der Steinzeit bis zur Gegenwart. Wachholtz, Neumünster.
- Bork, H.-R. (2020). *Umweltgeschichte Deutschlands*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Bronk Ramsey, C. (1995). Radiocarbon calibration and analysis of stratigraphy: The OxCal program. *Radiocarbon*, 37 (2), 425-430.
- Dette, H. H. (2000). Sturm und Wellen in der Nordsee. In H. Newig, Jürgen; Theede (Ed.), *Sturmflut. Gefährdetes Land an der Nordseeküste* 18–29. Ellert & Richter, Hamburg.
- Dierßen, K. (2004). Vegetation Schleswig-Holsteins. In Winkler, G.; Dahlke, C. & Bork, H.-R. (Ed.), *Streifzug durch 6000 Jahre Landnutzungs- und Landschaftswandel in Schleswig-Holstein: Ein Exkursionsführer*. *EcoSys Suppl.*41, 36–60. Verein zur Förderung der Ökosystemforschung, Kiel.



- Dittmann, S. (1999). *The Wadden Sea Ecosystem: Stability Properties and Mechanisms*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Eckelmann, W. (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung KA5*. Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Flemming, N.C., Çağatay, M.N., Chiocci, F.L., Galanidou, N., Jöns, H., Lericolais, G., Missiaen, T., Moore, F., Rosentau, A., Sakellariou, D., Skar, B., Stevenson, A. & H. Weerts (2014): Land Beneath the Waves: Submerged landscapes and sea level change. A joint geoscience-humanities strategy for European Continental Shelf Prehistoric Research. In: Chu, N.C. & N. McDonough (Hrsg.): Position Paper 21 of the European Marine Board, Ostend, Belgium.
- Grimm, C. (2017). Schadensanalyse für die schleswig-holsteinische Nordseeinsel Pellworm. *Die Küste*, 85, 73–89.
- Gripp, K. (1968). Zur jüngsten Erdgeschichte von Hörnum/Sylt und Amrum mit einer Übersicht über die Entstehung der Dünen in Nordfriesland. *Die Küste*, 16, 76–116.
- Hadler, H., Vött, A., Newig, J., Emde, K., Finkler, C., Fischer, P. & Willershäuser, T. (2018). Geoarchaeological evidence of marshland destruction in the area of Rungholt, present-day Wadden Sea around Hallig Südfall (North Frisia, Germany), by the Grote Mandrenke in 1362 AD. *Quaternary International*, 473, 37–54.  
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.09.013>
- Higelke, B.; Hoffmann, D. & Müller-Wille, M. (1976). Zur Landschaftsentwicklung und Siedlungsgeschichte der nordfriesischen Marscheninseln und Watten im Einzugsbereich der Norderhever. *Probleme der Küstenforschung Im Südlichen Nordseegebiet*, 11, 163–185.
- Higelke, B.; Hoffmann, D.; Kühn, H. J. & Müller-Wille, M. (1979). Geowissenschaftlich-archäologische Untersuchungen zur Landschafts- und Siedlungsgeschichte von Nordfriesland. *Archäologisches Korrespondenzblatt*, 9, 223–239.
- Hoffmann, D. (1980). Meeresspiegeldaten aus landschafts- und siedlungsgeschichtlichen Untersuchungen auf Pellworm (Nordfriesische Inseln). *Eiszeitalter u. Gegenwart*, 30, 229–236.
- Hoffmann, D. (1985). The Holocene marine transgression in the region of the North Frisian Islands. *Eiszeitalter und Gegenwart*, 35, 61–69. <https://doi.org/10.3285/eg.35.1.10>
- Hoffmann, D. (2004). Holocene landscape development in the marshes of the West Coast of Schleswig-Holstein, Germany. *Quaternary International*, 112(1), 29–36.  
[https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(03\)00063-6](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(03)00063-6)
- Karius, V.; Hadler, H.; Deicke, M.; Eynatten von, H.; Brückner, H. & Vött, A. (Ed.). (2011). *Dynamische Küsten - Grundlagen, Zusammenhänge und Auswirkungen im Spiegel angewandter Küstenforschung*. *Coastine Reports*, 17, 1-213.

- Kelletat, D. (2007). Die Küsten der Erde: Vielfalt, Geoarchive und Risikoräume . – Ein Beitrag zur 25. Jahrestagung des Arbeitskreises „Geographie der Meere und Küsten “. Coastline Reports, 9, 1–14.
- Khamnueva, S. (2017). Landscape development and soil transformation in the former Viking settlement Hedeby. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- Kohlhus, J., Steltzer, K., Gade, M., Geissler, J., Müller, G. & Eskildsen, K. (1998). Umweltatlas Wattenmeer. Band 1, Nordfriesisches und Dithmarscher Wattenmeer. Eugen Ulmer GmbH & Co, Stuttgart.
- Lorenzen-Schmidt, K.-J. & Pelc, O. (Eds.). (2000). Schleswig-Holstein Lexikon. Wachholtz Verlag, Neumünster.
- Meier, D. (2001). Landschaftsentwicklung und Siedlungsgeschichte des Eiderstedter und Dithmarscher Küstengebietes als Teilregion des Nordseeküstenraumes Teil 1 und Teil 2. Universitätsforschungen zur Prähistorischen Archäologie aus dem Institut für Ur- Und Frühgeschichte der Universität Kiel, 79, 1-175.
- Meier, D. (2007). Schleswig-Holsteins Küsten im Wandel. Von der Eiszeit zur globalen Klimaerwärmung. Boyens Buchverlag, Heide.
- Meier, D. (2012). Naturgewalten im Weltnaturerbe Wattenbmeer. Boyens Buchverlag, Heide.
- Meier, D. (2019). Schleswig-Holstein - Eine Landschaftsgeschichte (1st ed.). Boyens Buchverlag, Heide.
- Meier, D., Kühn, H. J. & Borger, G. J. (2013). Der Küstenatlas. Das schleswig-holsteinische Wattenmeer in Vergangenheit und Gegenwart. Boyens Buchverlag, Heide.
- Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, S.-H. (2015). *Strategie für das Wattenmeer 2100*. [http://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/N/nationalpark\\_wattenmeer/bericht\\_strategie\\_wattenmeer2100.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](http://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/N/nationalpark_wattenmeer/bericht_strategie_wattenmeer2100.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
- Müller-Wille, M., Higelke, B., Hoffmann, D., Menke, B., Brande, A., Bokelmann, K., Saggau, H. E. & Kühn, H. J. (1988). Norderhever-Projekt Landschaftsentwicklung und Siedlungsgeschichte im Einzugsgebiet der Norderhever (Nordfriesland). Offa-Bücher, Bd. 66.
- Munsell, A. H. (2000) Munsell soil color charts, Munsell Color.
- Newig, J. (2004). Die Küstengestalt Nordfrieslands im Mittelalter nach historischen Quellen The coastal shape of Northern Frisia in the Middleage according to historical sources. Coastline Reports, 1, 23–36.
- Petersen, M. & Rohde, H. (1977). Sturmflut Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und der Elbe. Karl Wachholtz Verlag Neumünster.

- Prange, W. (1965). Die Höhe der Sturmflut vom 11. Oktober 1634 in Nordfriesland nach neuen Wasserstandsmarken. Zwischen Eider Und Wiedau, Heimatkalender für Nordfriesland, 40–48.
- Quedens, G., Hingst, H., Stück, G. & Wilts, O. (1991). Amrum Landschaft, Geschichte, Natur. Öömrang Ferian. Verlag Jens Quedens, Amrum.
- Rieken, B. (2008). Wütendes Wasser, bedrohliche Berge. Naturkatastrophen in der populären Überlieferung am Beispiel südliche Nordseeküste und Hochalpen. *Alpine Space - Man & Environment*, 4, 99–120.
- Sander, A., Deicke, M. & Karius, V. (2011). Bestimmung der Sedimentakkumulation auf Hallig Hooge. *Coastline Reports*, 17, 19–32.
- Siedschlag, D. (2017). Das Konzept Emotionale Vulnerabilität Ein Beitrag zur Hazardforschung am Beispiel der Insel Pellworm The concept of Emotional Vulnerability A contribution to hazard research using the island of Pellworm as an example. Dissertation, Universität Hamburg.
- Stephan, H.-J. (2014). Climato-stratigraphic subdivision of the Pleistocene in Schleswig-Holstein, Germany and adjoining areas. *Quaternary Science Journal*, 63(1), 3–18.  
<https://doi.org/10.3285/eg.63.1.01>
- Stoops, G. (2003). Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. Madison, USA.
- Tillmann, T. (2015a). Sturmflut-Events und Overwash-Prozesse: Spurensuche auf den Nord- und Ostfriesischen Inseln (Norderney und Amrum). *Coastline Reports*, 25, 105–119.
- Tillmann, T. (2015b). Aktuelle Küstenforschung an der Nordsee. *Coastline Reports*, 25, 1-132.
- Tillmann, T., Ziege, D. & Wunderlich, J. (2013). Holozäne Landschaftsentwicklung an der Westküste der Nordseeinsel Amrum. *Quaternary Science Journal*, 62(2), 98–119.  
<https://doi.org/10.3285/eg.62.2.02>
- Vogt, M., Deicke, M. & Karius, V. (2011). Bestimmung der Sedimentakkumulation auf Hallig Langeness im Winter Untersuchungsgebiet und Methoden Untersuchungsgebiet. *Coastline Reports*, 17, 49–58.
- Wolters, S., Segschneider, M. & Schlütz, F. (2016). Verwurzelt im Watt – Eine archäologisch-vegetationsgeschichtliche Untersuchung des Waldrestes südöstlich der Hallig Gröde. *Archäologische Nachrichten*, 49–51.

## 8. Anhang

### 8.1 Einstellungen Mastersizer 2000, Korngrößenanalyse

#### Sample handling mit Hydro 2000G

Material:	Material name:	Silica 0.1
	Disperant name:	Water
Sample Settings:	Pump Speed:	2000 RPM
	Stierer Speed:	900 RPM
	Tank Fill:	automatic
Measurements:	Measurement time:	30 Sek
	Background Time:	12 Sek.
Measurement Cycles Aliquots:		1 per SOP
Measurements:		8, Delay 10
Create Average Result:		✓
Cleaning:		Automatic
		Full Wash
		After each aliquot ✓
Flush cycles:		2

## 8.2 R-Skript Körnung

#### Grain size analysis ####

# Author: Joana Seguin, jseguin@ecology.uni-kiel.de (consultation by Georg Hoermann)

# Created on Thursday, July 26th, 2018

## changes/last edits:

# 08.08.2018: J. Seguin: add depth and additional information, plot ternary diagram

# 15.02.2021: G. Hörmann / S. Dazert: adapted to new RStudio Version 4.0.4

## aim:

# Create a script that automatically converts the output file from the Mastersizer into a clean, readable excel table

# First paragraph: data needs to be edited manually until the data looks the same for every study site

# Second paragraph does the analyses, allocation of grain size categories etc. automatically

## hint: don't use names of profiles/study sites in the variable names, but generalized terms!

#old:

#load("e:/sdazert/Amrum/Bodenanalysen/2019/KRW\_00/Grainsize\_KRW\_00.RData")

#setwd("e:/sdazert/Amrum/Bodenanalysen/2019/KRW\_00/")

#better:

# Session, set working directory, to source file location, der Pfad wird dann automatisch ins aktuelle Arbeitsverzeichnis verlegt

#### 1. prepare Mastersizer txt file ####

# get raw data from Mastersizer

# it is a txt file with sep is Tab and dec is a dot

# values are separated by Tab (large space) and decimal numbers represented with a dot - if not change parameters

raw\_data1 <- read.delim("./KRW\_01", header = TRUE, sep = "\t", dec = ",")

# install.packages("dplyr")

library(dplyr)

raw\_data1 %>% mutate\_if(is.factor, as.character) -> raw\_data1

# combine all raw data files in one file (only if the structure is exactly the same)

# Auch, wenn nur eine Tabelle vorhanden ist, trotzdem ausführen, da sonst raw\_data1 immer umbenannt werden muss in raw\_data

raw\_data <- rbind.data.frame(raw\_data1)

#falls Zellen ohne Werte (leer) sind durch NA (not available) ersetzen

```

is.na(raw_data$Result.Between.User.Sizes..Sizes.in.um.) <-
which(raw_data$Result.Between.User.Sizes..Sizes.in.um. == "")

# row 1, columns >30 contain numeric information grain size while header is automatically
labelled X to X.70

#rename colnames for the different fractions according to row 1 (Fraktionen Größen zu
Überschriften umwandeln)

colnames(raw_data)[30:101] <- raw_data[1, 30:101]
## 101 = total number of variables minus 1 (last column includes operator notes)

# delete first row containing the fraction sizes that have now been transferred to the header
data <- raw_data[-1,]

# only separate the averages
averages <- data[grepl("Average", data[,1]), ]

# delete all the additional measurement information except for Sample.Name and Obscuration

averages <- averages[,c(1, 18, 30:101)]

# transform that data into a narrow frame format (aus einer Messung (Zeile) Spalten für alle
Fraktionen konfigurieren)
# advantage: structure is always the same, even if grain size fractions or amount of fractions
may differ

# former reshape2 melt/cast functions

# install.packages("tidyr")
library(tidyr)

data_long <- gather(data = averages, key = "fraction", value = "measurement", c(3:74),
                    convert = TRUE, factor_key=TRUE)

# convert decides automatically if column names are num, int or bin
# factor_key decides if key values are stored as character (false) or factor (true)

# if there are any NAs in the fraction, set them to zero

data_long$measurement[is.na(data_long$measurement)] <- 0

data_long$measurement <- as.numeric(data_long$measurement)

## from here onwards all datasets should look exactly the same

#### 2. create grain size classes ####

```



```
# Fractions according to the German Bodenkundliche Kartieranleitung
```

```
#Grobsand/coarse sand: 630 - 2000µm  
#Mittelsand/medium sand: 200 - 630µm  
#Feinsand/fine sand: 63 - 200µm  
#Grobschluff/coarse silt: 20 - 63 µm  
#Mittelschluff/medium silt: 6,3 - 20 µm  
#Feinschluff/fine silt: 2 - 6,3 µm  
#Ton/clay: < 2,0 µm
```

```
# aim: create a new columns that automatically classifies the data_long$fraction into one of the  
7 classes
```

```
# turn a continuous numerical variable into a categorial factor by using cut()
```

```
data_long$class <- cut(data_long$fraction, breaks = c(0, 2, 6.3, 20, 63, 200, 630, 2000), labels =  
c('clay', 'fine_silt', 'medium_silt', 'coarse_silt', 'fine_sand', 'medium_sand', 'coarse_sand'))
```

```
# right = TRUE - by default, the right side of the interval is closed while the left is open
```

```
# get one sum for every class
```

```
# first solution
```

```
classes_long <- aggregate(data_long$measurement, by=list(Sample.Name =  
data_long$Sample.Name, Fraction = data_long$class), FUN=sum)
```

```
# alternative solution
```

```
library(dplyr)  
classes_long <- data_long %>%  
group_by(Sample.Name, class) %>%  
summarise(sum_fraction = sum(measurement))
```

```
names(classes_long)[names(classes_long)=="x"] <- "sum_fraction"
```

```
# put that data back into wide format
```

```
classes_wide <- spread(data = classes_long, key = "class", value = "sum_fraction")
```

```
# possible to stop the script here and save the table in Excel (macht Sinn, diese Tabelle mit den  
eigenen Daten zu speichern!)
```

```
# install.packages("xlsx")
```

```
# library(xlsx)
```

```
library(writexl)
```

```
write_xlsx(classes_wide, "./KRW_01.xlsx")
```

```
# dispensable control step
```

```
# if no data was lost on the way, all rows should sum up to 100%
```

```
classes_wide$percent <- as.numeric(rowSums(classes_wide[,2:8]))
```

```
####add soil type####
```

```
# attribute corresponding soil type from Bodenkundliche Kartieranleitung
```

```
attach(classes_wide)
```

```
# use the | in the if-condition to add several OR-conditions and the & to add AND-conditions
```

```
# here use nested ifelse-statements:
```

```
classes_wide$soil_type <- ifelse(clay <=8 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt) >80, "Uu",  
ifelse(clay <=8 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt) >50 &  
(fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=80, "Us",  
ifelse(clay <=8 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt) >40 &  
(fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=50, "Su4",  
ifelse(clay <=8 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt) >25 &  
(fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=40, "Su3",  
ifelse(clay <=5 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt) >10 &  
(fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=25, "Su2",  
ifelse(clay >5 & clay <=8 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt) >10 &  
(fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=25, "Sl2",  
ifelse(clay <=5 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt) <=10, "Ss",  
ifelse(clay >5 & clay <=17 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt) <=10, "St2",  
ifelse(clay >8 & clay <=12 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt) >10 &  
(fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=40, "Sl3",  
ifelse(clay >12 & clay <=17 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt) >10 &  
(fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=40, "Sl4",  
ifelse(clay >8 & clay <=17 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt) >40 &  
(fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=50, "Slu",  
ifelse(clay >8 & clay <=17 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt) >50 &  
(fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=65, "Uls",  
ifelse(clay >8 & clay <=12 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt) >65, "Ut2",  
ifelse(clay >12 & clay <=17 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt) >65, "Ut3",  
ifelse(clay >17 & clay <=25 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt)>65, "Ut4",  
ifelse(clay >17 & clay <=30 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt)>50 &  
(fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=65, "Lu",  
ifelse(clay >17 & clay <=25 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt)>40 &  
(fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=50, "Ls2",  
ifelse(clay >17 & clay <=25 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt)>30 &  
(fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=40, "Ls3",  
ifelse(clay >17 & clay <=25 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt)>15 &  
(fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=30, "Ls4",  
ifelse(clay >17 & clay <=25 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=15, "St3",  
ifelse(clay >25 & clay <=35 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=15, "Ts4",  
ifelse(clay >35 & clay <=45 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=15, "Ts3",  
ifelse(clay >25 & clay <=45 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt)>15 &  
(fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=30, "Lts",  
ifelse(clay >25 & clay <=35 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt)>30 &  
(fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=50, "Lt2",
```

```

ifelse(clay >35 & clay <=45 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt)>30 &
(fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=50, "Lt3",
ifelse(clay >30 & clay <=45 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt)>50 &
(fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=65, "Tu3",
ifelse(clay >25 & clay <=35 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt)>65, "Tu4",
ifelse(clay >45 & clay <=65 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=15, "Ts2",
ifelse(clay >45 & clay <=65 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt)>15 &
(fine_silt+medium_silt+coarse_silt)<=30, "Tl",
ifelse(clay >45 & clay <=65 & (fine_silt+medium_silt+coarse_silt)>30, "Tu2",
ifelse(clay >65, "Tt", NA)
))))))))))))))))))))))))))

```

```
detach(classes_wide)
```

```

# save soil type as factor e.g. in order to use it to group samples accordingly (für die Graphik
wichtig, da für die verschiedenen Bodentypen verschiedene Farben verwendet werden)
classes_wide$soil_type <- as.factor(classes_wide$soil_type)

```

```

# when using the dplyr additional attributes etc. is added to the dataframe
# get rid of it before saving the dataset (nur die reinform der Tabelle, keine versteckten
Informationen)

```

```
excel <- as.data.frame(classes_wide[,1:10])
```

```

#nach Entnahme im rProfil von oben nach unten sortieren
excel <- excel[c(6,5,26,24,21,19,16,14,12,11,8,9,2,3,1,4,7,10,13,15,17,18,20,22,23,25),]

```

```

# save this table in Excel
# library(xlsx)
write_xlsx(excel, "./Grainsize_data_KRW_01.xlsx")

```

```
### plotting ###
```

```
# ternary diagram (int. Korngrößendreieck)
```

```

# install.packages("ggtern")
library(ggtern)

```

```

##additional step: shorten Sample Name ##
# create an additional colum with short name

```

```

# delete "- Average" from the name (because it is identical for all)
excel$Name <- gsub(' - Average', "", excel$Sample.Name)

```

```

# delete "KRW_00" from the name (because it is identical for all)
excel$Name <- gsub('KRW_', "", excel$Name)

```

```
#Farbauswahl Legende blau/rot/grün, Farbanzahl beachten, je nach Probenanzahl#
sequential <- c("darkgreen","limegreen", "skyblue", "steelblue", "royalblue4", "orange1",
"orangered", "red3")
```

```
#bei nur 1,2 oder3 Bodentypen oder Proben
sequential <- c("blue", "red")
```

```
#2. Farbalternative (besser für viele Proben, hier 26...)
sequential <- rainbow(26)
```

```
ggtern(excel, aes(fine_sand+medium_sand+coarse_sand, clay,
fine_silt+medium_silt+coarse_silt, color = soil_type)) + #group color according to factor, add in
brackets: colour = soil_type
geom_point(size = 2) +
theme_light() + theme_showarrows() +
labs(x = "Sand", y = "Clay", z = "Silt", xarrow = "% Sand", yarrow = "% Clay", zarrow = "% Silt")+
#scale_color_manual(labels =
c("110","100","90","80","70","60","50","40","30_Humus","30","20","20_12,4m","10","10_13,5
m","0","10_minus","15_minus","20_minus","30_minus","40_minus","50_minus","58_minus","
60_minus","70_minus","75_minus","80_minus"),values = sequential)+
ggtitle("Grain Size Distribution KRW_01")
```

```
# scale_color_manual erzeugt eine Legende manuell. Evtl. für die Reihenfolge wichtig
```

```
#je nach dem was im Dreieck dargestellt werden soll, muss der Befehl "color = Sample.Name"
geändert werden,
#z.B. in color = soil_type (Überschriften aus Tabelle excel).
```

```
# create a grain size against depth plot
# therefore add depth column to long format
```

```
#merge(x = classes_long, y = TRI["total_depth_cm"], by.x = classes_long["Sample.Name"], by.y
= TRI["Sample.Name"])
#error
```

```
# wichtig: Das Global Environment speichern mit folgenden Befehl, dann muss beim nächsten
Öffnen das Environment nur noch mit dem Load-Befehl von oben geladen werden#
```

```
save.image("e:/sdazert/Amrum/Bodenanalysen/2019/KRW_00/Grainsize_KRW_00.RData")
```

## 9. Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir vorgelegte Dissertation selbständig verfasst und dass ich – abgesehen von der Beratung durch meine Betreuer – keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Die allgemein gültigen Zitierregeln für wissenschaftliches Arbeiten habe ich befolgt. Die Dissertation wurde an keiner anderen Fakultät oder Universität im Rahmen eines Prüfungsverfahrens vorgelegt. Sie ist nicht veröffentlicht worden und ich versichere eine solche Veröffentlichung vor Abschluss des Promotionsverfahrens nicht vorzunehmen. Die Arbeit wurde unter Einhaltung der Regeln guter wissenschaftlicher Praxis der Deutschen Forschungsgemeinschaft angefertigt. Kein akademischer Grad wurde entzogen.

Kiel, den 20.11.2021 \_\_\_\_\_  
Sophia Dazert